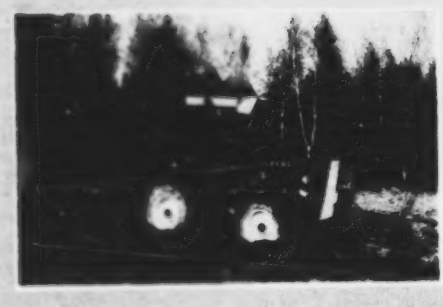
Agriculture Canada
Canadian Forestry Service

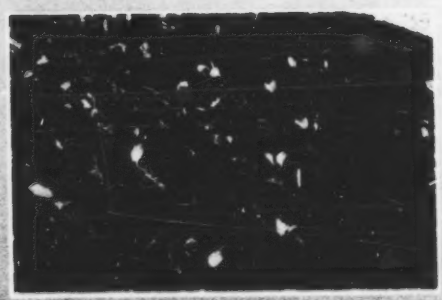
Agriculture Canada
Service canadien des forêts

Foresterie intensive: Quelques préoccupations socio-écologiques

A. Carlisle et L. Chatarpaul

Rapport d'information PI-X-43F
Institut forestier national de Petawawa





85-6641/

INSTITUT FORESTIER NATIONAL DE PETAWAWA

L'Institut forestier national de Petawawa (IFNP) a été créé le 1er avril 1979, suite au fusionnement de la Station expérimentale forestière de Petawawa et de deux Instituts établis à Ottawa; celui de l'aménagement forestier et celui de la recherche sur les feux de forêt. En 1980, est venue s'y adjoindre la Direction de la statistique forestière et des systèmes.

Son mandat, comme celui des autres établissements du Service canadien des forêts, est de promouvoir une meilleure gestion et une utilisation plus rationnelle des ressources forestières du Canada, pour le bien économique et social de tous les Canadiens. En tant qu'Institut national, il doit s'attacher à des problèmes qui débordent le cadre régional ou qui nécessitent des compétences particulières de même qu'un équipement coûteux, non disponible aux installations régionales du Service canadien des forêts. La plupart du temps, ses recherches sont effectuées en étroite collaboration avec le personnel des centres régionaux ou des services forestiers des provinces.

L'Institut mène en parallèle deux programmes de recherche:

RECHERCHES SUR LES FEUX ET EN TÉLÉDÉTECTION. D'immenses étendues de terres forestières productives sont ravagées chaque année au Canada par les feux de forêt. Les recherches portent sur le comportement des feux de forêt, sur de nouvelles méthodes pour les combattre. Elles s'attardent aussi à l'évaluation de matériel d'extinction et de retardateurs. Elles s'intéressent encore au développement de systèmes informatisés de défense contre les incendies, systèmes que ne tardent pas à utiliser les organismes qui, à travers le pays, luttent contre les feux. Quel est l'impact des feux de forêt sur l'environnement et l'économie et comment, en sylviculture, tirer parti du feu pour un aménagement intensif des forêts, demeurent aussi la préoccupation des chercheurs.

En télédétection, la recherche veut exploiter les récentes techniques aéroportées et spatiales. A cet égard, ARIES, le système de traitement des images numériques s'avère des plus intéressants.

AMÉNAGEMENT INTENSIF DES FORÊTS. Alors que le Canada accentue ses efforts d'aménagement forestier pour répondre à une hausse prévue de la demande de bois, le rôle de ce programme d'aménagement à l'Institut prendra de plus en plus d'importance. Nul doute qu'un vaste programme de régénération intensive va nécessiter un approvisionnement sûr en semences de haute qualité des espèces voulues. En vue de constituer un meilleur stock de matériel sur pied, des recherches pour l'amélioration génétique des arbres forestiers sont grandement souhaitables. Si l'utilisation accrue de toute la partie aérienne de l'arbre (la biomasse) reste un objectif à atteindre, il faudra cependant étudier avec soin son incidence sur l'environnement; et l'on devra faire de même pour toute autre forme d'aménagement intensif. Des méthodes bio-technologiques permettant d'accroître le rendement tout en maintenant la productivité sont aussi à l'étude.

Pour mener à bien ses programmes de recherche, l'Institut dispose d'une superficie forestière de 98 km² dans la partie ouest de la réserve militaire de Petawawa. Il conserve, depuis les années 20, les registres des expériences et depuis cette même époque ne cesse d'aménager des placettes d'échantillonnage. La forêt sert également de laboratoire pour les écoles de la région. De plus, un centre d'accueil reçoit des visiteurs tout au long de l'été.

La Direction de la statistique forestière et des systèmes (DSFS), établie à l'Institut, est chargée de recueillir et de publier les données sur les ressources forestières du Canada. L'entremise du comité de l'inventaire des forêts, forme de responsables du fédéral et des provinces, facilite grandement ses rapports avec les organismes forestiers provinciaux pour améliorer et uniformiser les données sur ces ressources.

Par l'intermédiaire du programme FORSTATS, qui implique tous les centres régionaux du Service canadien des forêts, la DSFS coordonne, au sein de ce Service, la cueillette et la publication de statistiques nationales sur les forêts du Canada.

A tous les cinq ans, elle publie un inventaire des forêts du Canada. Ce rapport officiel renseigne sur les lieu, superficie, espèce et état de nos forêts. Ses nombreux contacts avec les provinces visent aussi à réunir le plus de données possibles sur les perturbations survenues en forêt: feux, récoltes, insectes, maladies, et opérations d'aménagement. Ces données sont essentielles pour planifier des stratégies à même de favoriser l'aménagement de cette ressource naturelle renouvelable et combien importante.

FORESTERIE INTENSIVE: QUELQUES PRÉOCCUPATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET ÉCOLOGIQUES

Rapport d'information PI-X-43F

A. Carlisle et L. Chatarpaul

Institut forestier national de Petawawa
Service canadien des forêts
Agriculture Canada
1984

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1984
N° de catalogue Fo46-11/43-1984F
ISSN 0228-0736
ISBN 0-662-92876-8

Pour obtenir d'autres exemplaires de cette publication, communiquer avec

Le Centre d'information technique et de distribution
Institut forestier national de Petawawa
Agriculture Canada
Chalk River (Ontario)
K0J 1J0

Tél.: (613) 589-2880

This publication is also available in English under the title **Intensive Forestry: Some socio-economic and environmental concerns.**

Table des matières

iv Résumé/Abstract

1 Introduction

1 Le besoin de produits forestiers de la société va croissant
3 Changements d'attitude
5 Conflits d'intérêt

7 Intensification de l'aménagement et de l'utilisation des forêts

10 Répercussions sur l'environnement

10 Le budget d'éléments nutritifs
11 Capital d'éléments nutritifs
12 Les gains d'éléments nutritifs
17 Pertes d'éléments nutritifs
21 Effets de la récolte et de l'aménagement intensifs sur les budgets d'éléments nutritifs
23 Remplacement des éléments nutritifs perdus

25 Effets génétiques

26 Effets socio-économiques

28 Conclusions

30 Bibliographie

Tableaux

37 1. Production moyenne de bois et de litière d'espèces feuillues dans cinq zones de latitude différentes (tonnes ha^{-1} an^{-1})
38 2. Répartition des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers (d'après Pritchett 1979)
39 3. Concentration de N, de P, et de Ca dans les éléments de bois de feuillus échantillonnés en juillet/août (d'après Carlisle et Methven 1979)
40 4. Répartition de l'azote dans les écosystèmes forestiers tempérés (N kg ha^{-1}) (Carlisle et Methven 1979)
41 5. Répartition des éléments macronutritifs dans les forêts tropicales (kg ha^{-1})
42 6. Gains d'éléments dus aux précipitations (kg ha^{-1} an^{-1})

43	7.	Apport de bases dans l'eau de pluie et les aérosols (d'après Miller 1979)
44	8.	Fixation de l'azote par des plantes et des écosystèmes différents (principalement d'après Fortin et al. 1979)
45	9.	Production d'éléments par des minéraux (d'après les données sur la météorisation fournies par Birkeland 1974 et Clayton 1979)
46	10.	Libération d'éléments due à la météorisation selon la méthode de calcul du bilan (d'après Clayton 1979)
47	11.	Résumé des gains d'éléments nutritifs dont bénéficient les écosystèmes forestiers (kg ha^{-1} an^{-1})

Résumé

Le présent rapport expose l'évolution récente des exigences de la société à l'égard des forêts, les changements d'attitude du public à l'égard des ressources forestières, et l'interaction croissante et donc la plus grande possibilité de conflits entre ces politiques, les questions socio-économiques et les préoccupations en matière d'environnement.

L'utilisation accrue de techniques intensives d'aménagement et d'exploitation des forêts, en particulier le raccourcissement des intervalles d'exploitation et l'exploitation par arbres entiers, imposera au sol des exigences croissantes. La distribution des éléments nutritifs dans la forêt est décrite par rapport aux composantes individuelles du mouvement des éléments nutritifs.

Il n'est pas sage de porter des jugements généraux, simplistes, sur les effets de techniques de récolte particulières. Ces effets sont propres à chaque site, à chaque espèce et à chaque élément, et subissent l'influence de nombreux facteurs en interaction que seule l'utilisation de modèles intégraux permet de mettre en perspective. La question de savoir si les répercussions de ces techniques sont acceptables doit être considérée dans le contexte des objectifs d'aménagement. À l'avenir, l'évaluation des répercussions sur l'environnement devrait faire partie intégrante des plans d'aménagement forestier.

Il n'est pas possible d'assurer la productivité à long terme simplement en appliquant des fertilisants sur les sols forestiers. La compréhension des processus physiques et biologiques est la clé du développement des méthodes de maintien de la fertilité du sol.

Les écoles de foresterie doivent mettre davantage l'accent sur la pédologie et sur les recherches concernant les processus forestiers afin de fournir les renseignements de base nécessaires à l'évaluation des répercussions sur l'environnement. Le rapport examine aussi les répercussions génétiques et socio-économiques de la foresterie et il propose que l'on se serve d'analyses socio-économiques plutôt que purement économiques pour évaluer les programmes forestiers.

Abstract

This report outlines recent changes in society's demands upon forests, shifts in public attitudes towards the forest resource, and the increasing interaction and potential conflict between these policies, socio-economic issues, and environmental concerns.

The increasing use of intensive forest management and utilization techniques, particularly the use of short rotations and whole tree harvesting, will make increasing demands on the soil. The distribution of nutrients in forests is described in relation to the individual components of nutrient flux.

It is unwise to make general, simplistic statements about the effects of any harvesting technique. Such effects are specific to site, species, and element, and are influenced by many interacting factors which can be placed in perspective only by using holistic models. The assessment as to whether or not impacts are acceptable must be considered in the context of management objectives. In the future, environmental impact assessment should be an integral part of forest management plans.

Long-term productivity cannot be attained by simply applying fertilizers to the forest soils. An understanding of physical and biological processes is the key to the development of methods for maintaining soil fertility.

Forestry schools must place greater emphasis on soil science and research into forest processes to provide the basic information needed to assess environmental effects. The report also discusses genetic and socio-economic impacts, and the suggestion is made that socio-economic rather than purely economic analyses be used in assessing forestry programs.

Avant de prendre sa retraite A. Carlisle était chercheur à l'Institut forestier national de Petawawa. L. Chatarpaul y est chercheur.

Manuscrit approuvé pour publication le 4 septembre 1984.

FORESTERIE INTENSIVE: QUELQUES PRÉOCCUPATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET ÉCOLOGIQUES

INTRODUCTION

Le but du présent document est d'exposer les récentes tendances en matière d'aménagement et d'exploitation des forêts, d'examiner les changements d'attitude que l'on remarque à l'heure actuelle en matière de forêts et de foresterie, d'analyser les facteurs socio-économiques qui sont en interaction avec les problèmes d'environnement, d'étudier les effets de l'exploitation des forêts sur la fertilité du sol, de définir les principaux problèmes, et de proposer des solutions pour l'avenir. Les auteurs se sont inspirés d'un rapport intitulé "Forest exploitation and environmental objectives" présenté à la 11e Conférence forestière mondiale tenue à Trinidad à 1980. Le thème de cette conférence était la contribution de la foresterie au développement économique et social. Les aspects économiques de la foresterie ont été examinés dans d'autres rapports présentés à la conférence et ne seront pas étudiés en profondeur dans le présent document.

Le besoin de produits forestiers de la société va croissant
Au cours des 30 dernières années, l'homme a dû faire face à cette réalité brutale : bon nombre de ressources naturelles apparemment sans limites, comme le bois de première qualité, les minerais à haute teneur et le pétrole facile à extraire s'épuisent rapidement. Certaines de ces ressources, comme le bois, sont théoriquement renouvelables, bien que des peuplements de très grands arbres puissent être disparus à jamais. D'autres ressources, comme les minéraux, sont théoriquement recyclables, mais leur réutilisation n'est pas toujours économique. Le pétrole, le charbon et le gaz naturel, sources vitales d'énergie et de produits chimiques pour la société industrielle moderne, sont non renouvelables.

Un peu tardivement, les habitants des pays industrialisés ont fait marche arrière et tournent maintenant leur regard vers les forêts renouvelables pour en tirer non seulement du bois et des fibres conventionnelles pour les pâtes, mais aussi un éventail de combustibles et d'aliments fourragers. Par contre, les habitants des pays en voie de développement comptent depuis des siècles sur la végétation ligneuse pour satisfaire une large part de leurs besoins en combustibles et en aliments fourragers. En outre, la société, au moins dans les pays industrialisés, veut de plus en plus de loisirs de plein air et exige à cette fin un accès plus facile aux forêts. Vu que les gens vont plus souvent en forêt et que les médias prêtent attention aux programmes de protection de la faune, la population s'intéresse de plus en plus aux modes d'exploitation de la forêt. Le public exige de participer davantage à l'élaboration des politiques concernant

l'exploitation, le renouvellement et la conservation des forêts et autres ressources naturelles. Le besoin croissant de produits forestiers doit donc être examiné dans le contexte des contraintes nées des préoccupations du public, qui entraînent habituellement une exploitation restreinte des forêts. Certaines de ces contraintes sont bien fondées, mais d'autres reposent sur des prémisses erronées. En conséquence, dans de nombreux pays industrialisés, on met présentement en place des systèmes d'information, d'interprétation et de sensibilisation afin de rendre le public capable de participer à l'exploitation des ressources et à l'élaboration des politiques.

La pénurie actuelle ou prévue d'eau potable qui sévit dans diverses régions du monde exerce aussi des contraintes sur l'exploitation de la forêt. Les responsables de travaux d'irrigation qui utilisent de vastes couches aquifères constatent qu'en de nombreux endroits (par exemple en Arizona, en Californie) le niveau d'eau décroît et la demande croissante d'eau de la part de l'industrie fait de l'eau douce l'une des denrées les plus rares au monde. Toute personne survolant le nord peu peuplé de l'Ontario où les lacs abondent aura de la difficulté à croire que l'eau est effectivement une denrée rare, mais il n'y a pas suffisamment d'eau là où on en a le plus besoin, c'est-à-dire près des villes. Le souci croissant du maintien de l'alimentation en eau a entraîné l'aménagement de forêts dans des bassins-versants afin de régulariser cette alimentation en eau. Des mesures de ce genre limitent la coupe, souvent sur de très vastes superficies. Par exemple, l'existence de grandes zones réservées pour les parcs et la conservation pourraient soustraire une large part de la forêt au cycle de coupe au Canada et aux États-Unis.

Le scénario global se résume donc en un besoin urgent d'un plus grand nombre de produits forestiers, conjugué aux contraintes plus rigoureuses imposées à la coupe du bois pour des raisons liées à l'environnement, à la conservation, aux loisirs, à la régularisation des eaux et aux questions scientifiques. Après avoir exploité pendant des siècles le bois de première qualité, on a maintenant tendance à produire plus de fibres par hectare grâce à un aménagement intensif et à tirer plus de produits des arbres grâce à la mécanisation (Reed 1973). Toutefois, plus on exploite la forêt, plus il faut y investir et l'intensification de la foresterie[1] doit se faire en tenant compte des contraintes sociales, économiques et écologiques.

---

[1]Aux fins de notre étude, la foresterie intensive comprend des pratiques d'aménagement comme la plantation de génotypes supérieurs, la lutte contre les mauvaises herbes avec des herbicides, la fertilisation, un raccourcissement des intervalles d'exploitation, la récolte par arbres entiers et autres techniques destinées à accroître le rendement le plus rapidement possible afin de fournir des fibres pour les produits forestiers conventionnels aussi bien que pour la production d'énergie.

Changements d'attitude

L'évolution récente de l'attitude de la société à l'égard des forêts, et certains changements subtils intervenus dans l'attitude des gens à l'égard de l'utilisation des ressources sont susceptibles d'avoir des répercussions majeures sur l'aménagement et l'exploitation des forêts dans un avenir immédiat. Grâce aux forêts qui prolifèrent dans de nombreux pays du monde, l'homme bénéficie depuis des siècles d'une surabondance d'arbres. Si les forêts fournissaient l'abri, le combustible et les matériaux de construction, elles n'en entravaient pas moins l'agriculture et menaçaient parfois la survie même de l'homme. Sauf dans certains pays européens, les êtres humains ne se sont rendus compte que récemment du fait que les ressources forestières ne sont pas inépuisables et qu'il faut donc les aménager et les entretenir. Même aujourd'hui, peu de gens comprennent la place importante qu'occupent les produits forestiers dans l'économie mondiale.

Le manque d'intérêt à l'égard des forêts a entraîné de faibles investissements dans le domaine de l'aménagement, de la recherche et du développement ainsi que la perpétuation de l'habitude contractée par l'industrie consistant à utiliser la forêt sans y investir quoi que ce soit en retour. Ou bien, si les gouvernements y investissent, il semble que ce soit seulement en cas d'extrême nécessité, pour faire face au risque de grande pénurie de fibres qui guette les produits forestiers traditionnels et les sources d'énergie. Les hommes politiques, les industriels et les bureaucrates ont mis du temps à prendre conscience de la nécessité d'investir de l'argent et de la main-d'oeuvre dans l'aménagement efficace des forêts. Comme Jack Westoby l'a résumé au 8e Congrès forestier mondial de Jakarta, en Indonésie, la foresterie vient de céder la position de parent pauvre qu'elle occupe depuis longtemps, position commandant une postérité absolue.

En outre, on a souvent oublié les effets des pratiques d'aménagement sur l'environnement forestier et le renouvellement des forêts. Même si on a appris aux forestiers à prendre en considération l'aspect du site dans leur planification, dans la plupart des cas les facteurs édaphiques n'étaient pas prépondérants pour eux. Dans de nombreux pays, la pédologie occupe toujours une place mineure dans l'enseignement de la foresterie, même si les sols forestiers et les ensembles génétiques sylvestres constituent les ressources forestières fondamentales. Les forestiers cherchent à atteindre des objectifs pratiques afin de satisfaire aux besoins à court terme de la société en matière de fibres de bois, de loisirs, etc. Les besoins et les attitudes de la société se sont toutefois modifiés au cours des vingt dernières années et les groupes écologistes exigent que l'on tienne compte des répercussions des pratiques forestières, en particulier dans les pays industrialisés. Influencés par ces pressions, de plus en plus de forestiers prennent conscience de la nécessité de prédire les effets de ces pratiques, et de la

pénurie de renseignements de base sur les processus forestiers. Trop souvent, si l'on interroge les scientifiques sur la façon dont la forêt devrait réagir à un traitement particulier, ils avouent ne pas le savoir.

Le public, particulièrement les écologistes les plus militants, répugne fortement à la perspective de toute exploitation forestière étendue et uniforme, particulièrement les coupes rases sur de vastes superficies et les monocultures de plantations. Comme en agriculture, il pourrait toutefois être plus économique dans certaines circonstances de cultiver un produit forestier uniforme sur de vastes superficies et de le récolter en grandes quantités plutôt que d'établir et de récolter des espèces diversifiées. L'aménagement et la récolte d'espèces diversifiées coûtent plus cher, et c'est le consommateur qui devra en fin de compte assumer ce coût supplémentaire. Par ailleurs, les monocultures à grande échelle, particulièrement là où il y a une base génétique très étroite, comportent des risques de dévastation par les insectes nuisibles et les maladies, et les coupes rases sur de vastes superficies peuvent avoir des effets négatifs sur les sols, sur la faune et, dans certains cas, sur les ensembles génétiques. À cet égard, le début qui oppose les forestiers et les écologistes dans les pays industrialisés s'est souvent soldé à l'avantage des écologistes, surtout à cause des pressions d'ordre politique. Avec l'augmentation prévue de la foresterie intensive - qui suppose l'uniformité des peuplements - ces conflits entre les écologistes et les forestiers s'aggraveront jusqu'à ce que le climat d'affrontement cède la place à une atmosphère de collaboration. En Amérique du Nord, les évaluations écologiques sont en voie de devenir partie intégrante de la plupart des plans d'aménagement industriels, et, si on le veut bien, il n'y a aucune raison pour que ces évaluations ne puissent faire partie des plans de travail forestiers. Il faudra cependant concevoir les évaluations écologiques de façon à réduire au minimum l'inertie opérationnelle que ces évaluations ont tendance à introduire. La foresterie est déjà frappée par une certaine inertie, et point n'a besoin d'empirer la situation.

Dans certains pays, les forestiers sont conscients des problèmes d'environnement et du rôle de chef de file qu'ils doivent assumer dans ce domaine. Malheureusement, en Amérique du Nord, de nombreux forestiers n'ont pas encore franchi la distance séparant d'une part l'ingénieur forestier se préoccupant uniquement d'exploitation et d'autre part le forestier soucieux de réaliser un aménagement, une exploitation et une régénération conformes aux principes écologiques. Dans le passé, il y avait de si vastes superficies de forêt accessibles et commercialisables que les aspects de l'aménagement et de la responsabilité en matière forestière retenait rarement l'attention.

Au cours des deux dernières décennies, des économistes se sont intégrés à la plupart des groupes chargés d'élaborer des

politiques et s'intéressant au développement de l'industrie et des ressources - même au niveau de recherche - et le domaine de la foresterie n'y a pas fait exception. Malheureusement, une froide analyse économique en termes de rentabilité ne convient pas aux situations forestières, parce qu'elle ne tient généralement pas compte des avantages non quantifiables au point de vue récréatif, esthétique et écologique. Les économistes ont tendance à négliger les répercussions socio-économiques de leurs recommandations. Néanmoins, l'activité dans le domaine de la foresterie est fréquemment jugée seulement d'après sa contribution au produit national brut et à la balance des paiements. Au cours des dernières années, toutefois, on a eu tendance à se méfier de plus en plus de ce type d'analyse de la politique forestière. Le gain économique ne s'identifie pas nécessairement au gain socio-économique et ce qui est bon pour un secteur de la société ne l'est pas nécssairement pour un autre (Westoby 1979).

L'inclusion dans la planification forestière d'une dimension de responsabilité tenant compte des besoins économiques, sociaux et écologiques devient chaque année plus fréquente. Le fait que cela a été le thème de la 11^{e} Conférence forestière du Commonwealth est un symptôme de l'évolution des attitudes en foresterie.

Conflits d'intérêt

L'utlisation multiple du sol est une méthode d'aménagement forestier acceptée dans de nombreux pays. Toutefois, pour utiliser ainsi le sol à des fins multiples, il faut avoir des objectifs bien déterminés, attribuer un ordre de priorité aux diverses utilisations, et évaluer les compromis à réaliser entre elles. Quel que soit le soin avec lequel les utilisations diverses sont intégrées, les conflits sont inévitables. Dans une forêt aménagée à la fois pour la production de bois et la régularisation des eaux, par exemple, il y a des contraintes concernant les stocks, les espèces, la géométrie des peuplements, le brûlage, etc. Une régularisation optimale des eaux s'effectue souvent au prix d'une production de bois inférieure. L'utilisation de la forêt à des fins de loisir est souvent en conflit avec l'exploitation de la forêt pour la production de bois, ainsi qu'avec les facteurs écologiques. Incidemment, les meilleurs sites de loisir sont souvent situés sur les sols les plus sensibles. De nos jours, les responsables de l'aménagement forestier font souvent face à un ensemble étonnamment complexe d'utilisations conflictuelles de la forêt qui ne sont pas faciles à quantifier ni à évaluer par des techniques d'optimisation.

Le développement de la foresterie intensive est susceptible d'aggraver ces conflits. Les systèmes à courts intervalles d'exploitation recourant à des peupliers, par exemple, sont les plus productifs sur les bonnes terres arables, et, tôt ou tard, avec l'accroissement de la demande de nourriture, il y aura vraisemblablement une concurrence pour obtenir des terres, et la répartition des superficies réservées respectivement à la forêt

et à la culture ne fera pas l'unanimité. Les partisans de systèmes à courts intervalles d'exploitation (30 ans) et de mini-intervalles (2 à 10 ans) sont à élaborer des systèmes "agro-forestiers" prévoyant la plantation d'arbres à croissance rapide et largement espacés au milieu de cultures agricoles jusqu'à ce que le couvert forestier se referme. Les avantages qu'offre cette façon de procéder sur le plan économique n'ont pas encore été démontrées, mais une analyse socio-économique pourra présenter les systèmes agroforestiers sous un jour plus favorable qu'une analyse conventionnelle des coûts et avantages abordant la question strictement sous l'angle financier. Des systèmes rentables de lots de bois sur ferme sont bien établis dans de nombreux pays, offrant à l'agriculteur du combustible, un revenu supplémentaire et une plus grande autonomie. Les relations difficiles entretenues entre le secteur de la foresterie et celui de l'agriculture pourraient être réglées si l'on adoptait de courts intervalles de rotation dans le domaine agricole, plutôt que de s'en remettre à la confrontation.

Un autre conflit qui peut devenir sérieux est la concurrence pour les fibres de bois qui existe entre les industries forestières (bois de charpente, pâte à papier, etc.), utilisant des produits forestiers conventionnels, et l'utilisation projetée de grandes quantités de bois pour les combustibles liquides et d'autres formes d'énergie. On a prévu une pénurie mondiale de fibres de bois pour les produits forestiers conventionnels, et les projets d'utilisation des fibres de bois sur une vaste échelle pour produire de l'alcool, du gaz et des combustibles solides peuvent créer des demandes qui se font concurrence. L'utilisation de forêts de qualité inférieure (de qualité inférieure pour les forestiers, mais pas nécessairement pour les écologistes) pour la production de combustibles et l'enlèvement des branches, des feuilles et même des souches pendant l'exploitation de forêts de meilleure qualité afin de fournir des fibres pour produire de l'énergie sont tous deux techniquement réalisables, mais peuvent fort bien entrer en conflit avec les objectifs écologiques. Si on considère les pressions du public, la priorité que ces objectifs reçoivent dans les plans d'aménagement pourra être supérieure à celle que la plupart des forestiers et des économistes prévoient. Il est probable que les préoccupation sociales et écologiques plutôt qu'économiques serviront à déterminer si les forêts seront utilisées pour la production d'énergie.

Il est peu probable que les fibres forestières soient utilisées sur une vaste échelle pour produire des combustibles liquides aux fins de transport dans les pays tempérés septentrionaux avant la résolution des problèmes de conception de moteur, de séparation des phases dans les mélanges d'alcool et d'essence, et de systèmes d'entreposage et de distribution. Cela ne se produira vraisemblablement pas avant la fin du siècle. L'utilisation de l'alcool fait à partir de la canne à sucre et des mélanges d'alcool et d'essence pour le transport obtient apparemment du succès et s'étend rapidement dans le climat chaud

du Brésil. Dans ce pays, toutefois, les problèmes de séparation des phases, de démarrage à froid et de fonctionnement à froid sont moins graves que dans les climats plus froids et l'infrastructure existante d'entreposage et d'approvisionnement n'est pas aussi bien établie que le sont les systèmes massifs de l'Amérique du Nord et de l'Europe (Adams 1979, Berger 1979, Gratch 1979). Même s'il peut y avoir un certain retard dans l'utilisation de l'alcool chez les pays tempérés septentrionaux, nous pourrons fort bien assister à une ample utilisation des forêts renouvelables à cette fin si la société rejette l'utilisation du charbon et du gaz naturel pour produire des alcools et de l'essence. Le public se rend de plus en plus compte du caractère non renouvelable du charbon et du gaz naturel et du risque d'accroissement des émissions de gaz carbonique, ce qui pourrait avoir, selon les prévisions, des effets majeurs sur le climat. L'utilisation des forêts pour la production d'énergie, en plus de celle du bois de chauffage, doit être acceptée comme une possibilité, et il faut, au cours de la planification, prendre en considération les conflits que peut entraîner cette utilisation.

INTENSIFICATION DE L'AMÉNAGEMENT ET DE L'UTILISATION DES FORÊTS

L'aménagement intensif des forêts est une réalité depuis de nombreuses années dans des pays comme l'Allemagne, la Grande-Bretagne, la France, l'Italie, la Suède et la Finlande où les forêts indigènes ou bien ont disparu ou bien ont une faible productivité. Les systèmes d'aménagement de plantations dans ces pays sont bien développés et comportent des perfectionnements comme l'utilisation de stocks supérieurs au point de vue génétique. Les forestiers possèdent une solide formation en aménagement et en utilisation des forêts. Certains pays possédant des forêts naturelles plus étendues ont enlevé le meilleur bois et montrent de l'intérêt pour des espèces qui, aux plus beaux jours de l'exploitation forestière, étaient regardées comme des espèces de mauvaise qualité. Les États-Unis passent de la phase de l'exploitation à la phase de l'aménagement, comme le reflète l'accroissement de la superficie des plantations de pins aménagées de façon intensive. La Nouvelle-Zélande a beaucoup développé ses plantations de Pinus radiata à croissance rapide afin de produire les fibres de bois requises de façon urgente, et elle s'intéresse de plus en plus à la sélection et à l'amélioration génétique d'espèces à croissance rapide et de génotypes destinés à raccourcir les intervalles d'exploitation et à produire plus de fibres à l'hectare. Des espèces comme le peuplier (esp. Populus et hybrides), le sycomore (esp. Acer), le mélèze (esp. Larix et hybrides), le frêne (esp. Fraxinus) et le saule (esp. Salix) sont choisies, cultivées et testées pour fournir une possibilité élevée. Toutefois, les pays qui ont d'immenses ressources forestières comme le Canada, ont dans une certaine mesure tardé à faire de l'aménagement intensif; on n'y fait qu'amorcer le passage de l'exploitation à l'aménagement

forestier. Le Canada, l'Union soviétique et le Brésil possèdent toujours d'immenses ressources de bois dans des régions éloignées des usines et autres centres de transformation. Il est urgent de cultiver le bois plus près des usines de façon à réduire les coûts de transport découlant de l'escalade du prix des produits pétroliers. Au cours des cinq dernières années, il y a eu un regain extraordinaire d'intérêt au Canada à l'égard de la culture d'arbres comme les peupliers sur les terres arables abandonnées et de l'intensification de l'aménagement forestier dans son ensemble (Reed 1973, Raitanen 1978).

Les différences entre une forêt aménagée de façon intensive et une forêt naturelle sont parfois spectaculaires sur le plan de la possibilité. Par exemple, au Canada, la forêt naturelle produit en moyenne moins d'une tonne ha^{-1} an^{-1} de fibres de bois. Par contraste, les plantations de peupliers hybrides peuvent produire jusqu'à 16 tonnes anhydres ha^{-1}, les plantations de sycomores (Platanus occidentalis) jusqu'à 19 tonnes anhydres ha^{-1}, et les plantations d'aulne rouge (Alnus rubra) jusqu'à 15 tonnes anhydres ha^{-1} (Raitanen 1978, Ek et Dawson 1976, Bélanger et Sancier 1975, Steinbeck et May 1971, De Bell et al. 1978, Carlisle et Methven 1979). Toutefois, il en coûte beaucoup plus cher de produire des stocks, de cultiver, de contrôler les mauvaises herbes, de planter, de fertiliser et de maintenir des plantations de peupliers en recourant à de mini-intervalles d'exploitation que d'aménager une forêt naturelle. Il faut obtenir de plus amples renseignements sur le côté économique de ces systèmes à mini-intervalles d'exploitation (Pfeiffer 1979).

Les forêts naturelles de la zone tempérée septentrionale ont généralement une production faible, avec certaines exceptions comme pour l'aulne rouge (Alnus rubra) dans les endroits fertiles. La nature s'y préoccupe davantage de survie que d'une production élevée de fibres. Cette production peu élevée, de même que les salaires élevés, accroissent les coûts d'exploitation et de transport, d'où la difficulté pour les industries forestières dans les pays industrialisés d'être compétitives sur le marché mondial.

Les forestiers du nord regardent à la fois avec envie et inquiétude les conditions de croissance apparemment idéales dans les régions tropicales. D'après les estimations, la production primaire nette dans les tropiques s'éleve en moyenne à environ 2400 g m^{-2} an^{-1} (Murphy 1975, Lugo et al. 1973) avec un maximum de 3210 g m^{-2} an^{-1} au Sarawak (Murphy 1975), alors que les forêts tempérées ont une production moyenne d'environ 1300 g m^{-2} an^{-1} et les forêts boréales de seulement 800 g m^{-2} an^{-1}. Certains auteurs comme Westlake (1963) donnent des valeurs encore supérieures (de 2600 à 5200 g m^{-2} an^{-1}) concernant la productivité des forêts tropicales. Ces chiffres bruts pourraient nous amener à conclure que les forêts tropicales ombrophiles sont parfaites pour la production de bois à coût modique. Mais Jordan (1979) et d'autres auteurs (par exemple

Whitmore 1975, Kato et al. 1974) font une mise en garde à ce sujet. Jordan fait ressortir que bien que la production primaire nette des forêts naturelles dans les tropiques soit sans aucun doute supérieure à celle des zones tempérées, cela est dû à une production plus élevée de feuilles et non à une production beaucoup plus élevée de bois (Tableau 1).

Les sols tropicaux ont souvent une faible fertilité et certains, comme ceux du centre et de l'est de l'Amazonie, sont virtuellement oligotrophiques et très sensibles aux perturbations. L'absence de saisons permet aussi aux insectes nuisibles et aux maladies de proliférer. La forêt survit à ces attaques à cause de la grande diversité de ses espèces et de ses caractéristiques génétiques. On a établi des monocultures d'espèces comme le Pinus caribaea au Venezuela, à Puerto Rico et au Brésil sur des sols tropicaux sensibles de faible fertilité et la récolte apparaît bonne (c'est-à dire que la production de bois est de 8 à 10 tonnes ha^{-1} an^{-1}), mais aucun renseignement n'est encore disponible sur les effets de cette production sur le sol, sur les répercussions de l'action des insectes nuisibles et des maladies, ou sur la productivité de la deuxième génération. Les écologistes surveillent ces développements avec intérêt. Les projets majeurs comme ceux mis en oeuvre au Brésil font par ailleurs intervenir des milliers de travailleurs étrangers et ils ont des répercussions sociologiques massives.

Les forestiers de la zone tempérée, par conséquent, ne doivent pas envier leurs collègues des tropiques. Les sols de cette zone sont moins sensibles que ceux des tropiques et l'existence de saisons, avec des hivers froids, élimine une partie des insectes nuisibles et des maladies. Les forestiers des zones tempérées ont une belle occasion d'accroître la production, sous réserve bien sûr des contraintes écologiques, économiques et sociales.

L'intensification de la foresterie a provoqué une tendance au raccourcissement des intervalles d'exploitation et à la récolte d'un plus grand nombre de parties d'arbres. Les intervalles plus courts d'exploitation signifient une perturbation fréquente des sites et la récolte d'arbres plus petits et plus jeunes comprenant un plus fort pourcentage d'écorce et des concentrations plus élevées d'éléments nutritifs. La récolte des tiges, des branches, des rameaux et des feuilles enlève un plus grand nombre d'éléments et plus de carbone du site que ce n'était le cas pour l'exploitation traditionnelle du bois rond. Le rythme de l'activité forestière est passé d'une succession lente et complexe des plantes dans la forêt naturelle non aménagée, où la survie constitue la plus grande priorité, à un aménagement intensif en vue d'obtenir de plus grandes quantités par unité de superficie de produits ligneux plus uniformes en un laps de temps aussi court que possible, le profit commercial constituant la plus haute priorité.

Dans la forêt naturelle, le forestier pouvait se permettre d'être prudent et de se concentrer sur son calendrier d'exploitation. À l'avenir, les forestiers devront être alertes et regarder plus loin que les simples exploitation et regénération forestières s'ils veulent maintenir la productivité de systèmes de foresterie intensive nécessairement instables. Dans ce contexte de foresterie intensive, les questions de conservation de l'environnement devront occuper la première place dans l'esprit des forestiers lorsqu'ils établissent leurs plans.

RÉPERCUSSIONS SUR L'ENVIRONNEMENT

Dans la présente section, nous nous concentrons sur les répercussions de l'exploitation forestière sur la fertilité du sol, tout en faisant état de certains autres facteurs.

Le budget d'éléments nutritifs
À moins que la forêt ne soit un système fermé, stationnaire (qui n'existe qu'en théorie), les éléments nutritifs du sol entrent dans le système, y circulent et en ressortent. Le budget d'éléments nutritifs d'une forêt naturelle non perturbée par la présence humaine peut s'exprimer sous forme d'un modèle simple :

$$\Delta E_{p+s} = E_R + E_M - E_L \pm E_G - E_F - E_E$$

où ΔE_{p+s} = le changement annuel (en + ou en -) dans la quantité d'éléments nutritifs E dans la végétation et dans le sol de l'écosystème.

$+E_R$ = gains annuels provenant des précipitations + aérosols.

$+E_M$ = gains annuels provenant de la météorisation des minéraux.

$-E_L$ = pertes annuelles par le lessivage du sol (sortie dans les cours d'eau).

$\pm E_G$ = gains ou pertes annuels dus à l'échange gazeux (c'est-à-dire les pertes d'oxydes d'azote, les gains provenant de la fixation de l'azote si E représente l'azote).

$-E_F$ = pertes par le feu.

$-E_E$ = pertes dans les sédiments par érosion.

Les attaques d'insectes ne sont pas incluses, car elles redistribuent les éléments nutritifs et ne signifient pas nécessairement une perte nette de minéraux pour le système.

Dans les forêts où l'aménagement intensif suit la récolte, un nombre plus élevé de facteurs, par exemple les pertes dues à la récolte ($-E_H$) et les gains dus aux fertilisants chimiques

($+E_C$), entrent dans le tableau. Le temps prend aussi de l'importance. Les éléments nutritifs perdus par le système lors de l'exploitation au moment t_1 doivent être remplacés avant la récolte suivante au moment t_2 pour que soit maintenu le capital d'éléments nutritifs. À supposer qu'il y ait un feu par intervalle d'exploitation, et une application initiale de fertilisant, le modèle devient :

$$\sum_{t_1}^{t_2} \Delta E_{p+s} = -E_H + \sum_{t_1}^{t_2} E_R + \sum_{t_1}^{t_2} E_M - \sum_{t_1}^{t_2} E_L \pm \sum_{t_1}^{t_2} E_G - E_F - \sum_{t_1}^{t_2} E_E + E_C$$

La durée de l'intervalle d'exploitation ($t_2 - t_1$) constitue évidemment un facteur déterminant du gain ou de la perte d'éléments nutritifs pendant cet intervalle. Ce modèle n'est pas modifié chaque année pour tenir compte des facteurs : récolte (E_H), feu (E_F) et fertilisation (E_C). L'importance des gains annuels d'éléments assurés par la pluie, la neige et les aérosols (E_R), l'altération atmosphérique des minéraux (E_M), les pertes d'éléments nutritifs par lessivage (E_L) et l'échange gazeux (E_G) varie beaucoup selon la durée de l'intervalle de rotation. La perte due à la récolte (E_H) se produit une seule fois pendant l'intervalle d'exploitation, à moins que la forêt ne fasse l'objet d'une éclaircie, mais à cause de son ampleur, elle constitue un facteur déterminant dans le budget d'éléments nutritifs. La même chose vaut pour le feu.

L'adoption de courts intervalles de rotation (raccourcissement de t_2 à t_1) et l'exploitation par arbres entiers (accroissement d'E_H), ont par conséquent beaucoup d'influence sur l'équilibre des éléments nutritifs. Idéalement, l'exploitation par arbres entiers devrait être suivie par un long intervalle d'exploitation afin d'assurer au capital d'éléments nutritifs le temps de se refaire. L'utilisation conjuguée de l'exploitation par arbres entiers, et de courts intervalles d'exploitation accentuent grandement la perte d'éléments nutritifs.

Capital d'éléments nutritifs

Le capital d'éléments nutritifs est une réalité dont le forestier doit tenir compte. Le tableau 2 (d'après Pritchett 1979) fournit une idée approximative de la teneur en éléments nutritifs dans les écosystèmes boréaux et tropicaux. Les niveaux de phosphore sont comparables, mais la quantité des autres éléments varie beaucoup. Il est intéressant de noter que, dans la forêt tropicale humide, la plus grande partie du phosphore et du potassium se trouve dans la végétation qui peut être enlevée lors de la récolte. En outre, l'enlèvement complet de la biomasse sur les sites boréaux priverait le sol d'environ 45 % de son calcium. Toutefois, la plus grande partie du capital total d'éléments nutritifs peut ne pas être disponible pour la végétation, comme de l'argent bloqué dans une chambre forte dont l'accès est très limité. Le capital total d'éléments nutritifs constitue par conséquent une valeur maximale et peut être trompeur. La partie

du capital disponible pour la végétation est ce qui compte vraiment, et elle est difficile à mesurer. L'importance du gain ou de la perte d'éléments nutritifs exprimée sous forme de proportion du capital total ne correspond pas nécessairement à la réalité, mais elle se révèle dans la plupart des cas le meilleur guide que nous ayons.

La quantité d'éléments nutritifs perdus lors de la récolte est la somme des produits de la biomasse et de la concentration d'éléments nutritifs pour chaque composante de l'arbre récoltée. De façon générale, les concentrations d'éléments nutritifs dans l'écorce, les branches et les feuilles sont plusieurs fois supérieures à celles contenues dans le bois de fût (par exemple, Tableau 3). Étant donné que les jeunes arbres ont une forte proportion d'écorce, de branches et de feuilles, leurs concentrations moyennes sont plus élevées que celles des arbres plus âgés. Il s'ensuit par conséquent que les systèmes forestiers intensifs, à haute productivité, recourant à la récolte par arbres entiers et à des courts intervalles d'exploitation, avec leur biomasse élevée, leur forte concentration et leur courte période de récupération mettront lourdement à contribution les ressources du sol en éléments nutritifs.

Les tableaux 4 et 5 fournissent la répartition de l'azote dans les forêts des zones tempérées et tropicales. La situation sera très différente dans le cas du phosphore et des bases par rapport à celle de l'azote, et il existe peu de données concernant la répartition des oligo-éléments nutritifs.

Les gains d'éléments nutritifs

Les éléments comme l'azote, le phosphore et les bases pénètrent dans les écosystèmes forestiers par le biais des précipitations, des aérosols, de la poussière, de la météorisation des minéraux, de la fixation de N_2 et de la faune en mouvement. Dans la plupart des études sur les gains d'éléments nutritifs sous forme de précipitations, l'eau de pluie, la neige, les aérosols et la poussière sont groupés dans la même catégorie. Les estimations peuvent bien être faibles, particulièrement en ce qui concerne les climats océaniques, où les aérosols contenant des bases tombent sur la surface des arbres au cours des périodes où il n'y a pas de pluie pour ensuite retomber au sol au moment des précipitations sans être enregistrés dans la pluie incidente. La météorisation des minéraux et la fixation de l'azote seront étudiées en détail à cause de leur importance. Les gains d'éléments nutritifs et les pertes de ces mêmes éléments dans la faune et celles occasionnées par la circulation des insectes tendent à s'annuler mutuellement et ne seront pas examinés dans le présent rapport.

L'apport d'éléments en provenance de sources naturelles, à l'exception de la fixation de N_2, échappe à l'action du forestier. Il peut, bien sûr, introduire des plantes fixatrices d'azote ou stimuler une plus grande fixaton d'azote par les

organismes indépendants en fournissant un meilleur substrat comme source d'énergie et en modifiant le pH du sol. Néanmoins, il faut tenir compte de ces sources de "fertilisants gratuits" qui constituent les crédits principaux figurant annuellement sur le bilan des éléments nutritifs.

L'abaissement du pH de la pluie à cause des émissions industrielles d'oxydes d'azote et de soufre, et ses répercussions sur les forêts dépassent la portée du présent rapport. Les lecteurs sont priés de consulter la documentation, particulièrement les recherches effectuées en Norvège (Abrahamsen et al. 1976, Denison et al. 1976, Rennie 1978, Overrein 1976). Il suffira de dire que les pluies acides constituent un facteur important dans l'interaction entre la société et l'environnement forestier. Une couverture d'arbres peut avoir tendance à ajuster le pH de la pluie lorsque cette dernière passe à travers le couvert forestier, mais il y aura vraisemblablement un abaissement du pH dans de nombreux sols forestiers ayant une capacité d'ajustement à un pH donné, avec des conséquences d'une portée incalculable pour l'activité des micro-organismes du sol et leur capacité d'échange d'ions, deux facteurs clés de la dynamique du sol forestier. Il reste à décider si ce problème doit être abordé d'un point de vue politique ou technologique.

Gains d'éléments nutritifs sous forme de précipitations

Les chutes de pluie et de neige, les aérosols et la poussière dans l'atmosphère contiennent tous des oligo-éléments nutritifs et, même si les gains annuels peuvent parfois être faibles, sur de longs intervalles d'exploitation, par exemple 100 ans, les éléments provenant de cette source constituent une partie vitale de la dynamique forestière et du renouvellement du capital d'éléments nutritifs.

Chutes de pluie et chutes de neige. Les gains varient selon la quantité de précipitations et la proximité de sources d'éléments comme les océans et les émissions industrielles. Le tableau 6 fournit quelques exemples pour l'Amérique du Nord. Les gains d'azote sont habituellement d'environ 5 kg ha^{-1} an^{-1} avec certaines valeurs très élevées (par exemple 41,4 kg ha^{-1} an^{-1}) en région polluée. Les gains de calcium sont d'environ 6 kg ha^{-1} an^{-1}, allant de 0,9 à 23,5 kg ha^{-1} an^{-1}. Il y a moins de potassium; environ 2,5 kg ha^{-1} an^{-1} (de 0,9 à 5,6 kg ha^{-1} an^{-1}). Sur une période de 100 ans, par conséquent, environ 500 kg ha^{-1} d'azote, 600 kg ha^{-1} de calcium et 250 kg ha^{-1} de potassium entrent dans les systèmes de cette façon. Ces quantités sont substantielles. Il existe peu de données fiables concernant le phosphore. Il est présent en concentrations très faibles dans les chutes de pluie. L'activité des micro-organismes dans les contenants servant à recueillir l'eau de pluie rend difficile l'évaluation des gains de cet élément nutritif.

Aérosols. Les estimations des gains d'éléments nutritifs provenant des aérosols (distincts des chutes de pluie et des

chutes de neige) sont peu nombreuses, mais Mayer et Ulrich (1974) ont obtenu des données sur les aérosols pour un peuplement de hêtres en Allemagne centrale, et Miller et ses collègues (1976) ont étudié un peuplement côtier de pins de Corse en Écosse (Tableau 7) (Miller 1979). D'après ces données, il est évident que les gains de bases provenant des aérosols (qui sont habituellement omis dans les budgets forestiers d'éléments nutritifs) peuvent être du même ordre que les gains dus aux chutes de pluie, ou supérieurs à ceux-ci, à la fois dans le climat océanique de l'Écosse et le climat continental de l'Allemagne centrale.

Gains provenant de la fixation de l'azote

L'azote pénètre dans les écosystèmes forestiers grâce à la fixation biologique de l'azote moléculaire contenu dans les organismes indépendants (par exemple, les bactéries et les cyanophycées) et aux symbioses entre les micro-organismes fixateurs d'azote et les plantes supérieures, qu'elles fassent partie de la famille des légumineuses ou non. Pendant ces symbioses, le micro-organisme reçoit de la plante hôte l'énergie nécessaire pour fixer l'azote moléculaire. La réduction de l'azote moléculaire (N_2) à l'ammoniaque (NH_3) par la technique de réduction de l'acétylène nécessite beaucoup d'énergie.

L'importance des gains d'azote provenant de la fixation varie selon les écosystèmes et les espèces. À l'heure actuelle, nous en savons davantage au sujet de la fixation d'azote en agriculture qu'en foresterie, mais la découverte de la technique de réduction de l'acétylène pour mesurer l'activité de l'enzyme nitrogénase a rendu l'estimation des taux de fixation d'azote considérablement plus facile. Le tableau 8 donne une idée des taux de fixation de l'azote selon les divers écosystèmes et les diverses espèces (d'après Fortin et al. 1979).

Les taux agricoles de fixation de l'azote sont élevés (10 à 300 kg ha^{-1} an^{-1}), particulièrement dans le cas des légumineuses. La fixation de l'azote par les forêts (0,4 à 300,0 kg ha^{-1} an^{-1}) est variable, mais les estimations sont peu nombreuses et il faudra davantage de données pour connaître la véritable situation. Les aulnes (esp. Alnus) peuvent fixer l'azote (12 à 300 kg ha^{-1} an^{-1}) aussi rapidement que les légumineuses (47 à 300 kg ha^{-1} an^{-1}). Ce n'est que récemment que la symbiose de l'aulne a été comprise et l'endophyte (Frankia) identifié. Lorsqu'on aura surmonté les problèmes d'isolation et du culture d'endophyte, il sera possible de choisir des génotypes endophytes possédant une aptitude supérieure à la fixation de l'azote.

Au cours des années récentes, il y a eu un accroissement de l'intérêt vis-à-vis l'utilisation du potentiel de fixation d'azote comme outil d'aménagement forestier afin de maintenir la fertilité du sol, d'accroître la production et de diminuer le recours à des fertilisants azotés coûteux et dévoreurs d'énergie.

Nous comprenons de mieux en mieux le rôle de la fixation de l'azote dans la dynamique de la forêt, et il est maintenant clair que les organismes fixateurs d'azote sont actifs non seulement dans le sol, mais aussi dans les billes en pourriture et dans la phyllosphère. Par exemple, les micro-organismes dans la phyllosphère du sapin Douglas (Pseudotsuga menziesii) fixent l'azote à un taux de 7 à 23 kg ha^{-1} an^{-1} (Burns et Hardy 1975). Jones (1976) a observé que les micro-organismes fixateurs d'azote sont présents sur les feuilles de nombreuses espèces d'arbres, à la fois des conifères et des feuillus, en Grande-Bretagne. Par exemple, il a calculé (en 1970) que de 53,6 à 119,5 g ha^{-1} $jour^{-1}$ d'azote étaient fixés dans la phyllosphère du sapin Douglas pendant la saison de croissance. Même les billes pourries d'arbres comme le châtaignier (Castanea) sont le lieu d'une activité de fixation d'azote (0,9 kg ha^{-1} an^{-1}) (Cornaby et Wade 1973). Des lichens, par exemple les espèces Peltigera, Stereocaulon, Colleme, et Nephroma, contiennent des algues comme les espèces Nostoc et Stigenema qui fixent l'azote à un taux de 26 à 310 mg cm^{-2} an^{-1} (Henriksson 1971). Granhall et Linberg (1978) signalent que les micro-organismes dans la litière (couverture vivante de surface de fond et autres débris) des collectivités de Sphagnum dans les forêts de confières en Suède fixent jusqu'à 37 kg ha^{-1} an^{-1} par année.

Il apparaît maintenant que la fixation de l'azote se produit en divers endroits à travers les forêts du nord. La symbiose fixatrice d'azote des arbres, de la végétation du sol et des lichens; les bactéries indépendantes et les cyanophycées dans le sol et sur le bois qui pourrit; les micro-organismes intimement associés à la rhyzosphère; et les micro-organismes sur la surface des feuilles des arbres et la flore du sol, fixent tous de l'azote moléculaire inerte sous une forme utilisable par la végétation. La plupart des estimations de la fixation d'azote dans la forêt sont probablement faibles, parce que les lieux d'activité n'ont pas tous encore été identifiés et examinés. Il est à prévoir que l'avenir de la fixation de l'azote jouera un rôle de premier plan dans l'aménagement forestier, et elle recevra sûrement plus d'attention à titre d'apport d'azote dans les études sur le mouvement de l'azote dans les forêts.

Gain provenant de la décomposition des minéraux

Le dégagement des minéraux provenant de la météorisation des roches à l'intérieur de l'écosystème a été jusqu'à maintenant la partie la moins connue de tous les budgets et cycles d'éléments nutritifs. Récemment, toutefois, certains pédologues comme Pritchett (1979) et Clayton (1979), et des écologistes comme Marchand (1971), Frederiksen (1972), Cleaves (1970, 1974), Likens (1977), et Woodwell et Whittaker (1967) ont commencé à jeter du jour sur le sujet. La recherche s'est effectuée selon deux techniques différentes, la méthode de la couche météorisée et la méthode de calcul du bilan.

La météorisation des roches à découvert, des gros cailloux, etc., forme une couche supérieure de roches décomposées utilisée par les géologues aux fins de datation et plus récemment par les pédologues pour étudier le dégagement d'éléments nutritifs. Les pierres granitiques sur les glaciers du Colorado ont une couche météorisée épaisse de 15 mm après 5000 ans et de 45 mm après 15 000 à 20 000 ans, la météorisation est donc un lent processus (Birkeland 1973, 1974). Les roches volcaniques se décomposent de 0,01 à 0,1 fois plus lentement que les roches plutoniques grossières (Colman 1977). Pendant la météorisation, des éléments sont dégagés. Par exemple, la biotite s'hydrolyse et dégage du fer et du magnésium, transforme par oxydation l'oxyde ferreux en oxyde ferrique, et dégage du potassium. En utilisant la technique de la couche météorisée, Clayton (1979) a calculé le dégagement d'éléments nutritifs en provenance de plusieurs minéraux (Tableau 9) dans un sol jeune contenant du gravier frais. Le potentiel de production d'éléments est très grand, beaucoup plus que ce qui tombe annuellement dans les précipitations.

La méthode du calcul du bilan a été utilisée dans les études sur les bassins-versants (par exemple Marchand 1971, Frederiksen 1972, Cleaves et al. 1970, 1974, Likens et al. 1977) et au lysimètre (Woodwell et Whittaker 1967). Les arrivées et les pertes d'éléments nutritifs, ainsi que l'augmentation ou la diminution de la biomasse, et l'alluvionnement du sol sont calculés pour l'ensemble du système et on résout une équation de bilan de la masse concernant les éléments (Clayton 1979). Par exemple, la libération annuelle de calcium due aux processus de météorisation est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$Ca_{rw} = (\text{écoulement de Ca} - \text{arrivée de Ca (précipitations)}) + \Delta C_{p+s}$$

où

Ca_{rw} = libération annuelle de calcium due à la météorisation.

Écoulement de Ca = perte annuelle de calcium dans les cours d'eau.

Arrivée de Ca (précipitations) = arrivée annuelle dans les précipitations.

ΔCa_{p+s} = changement annuel net dans l'accumulation de calcium dans les plantes et dans le sol.

Les gains provenant de la météorisation de plusieurs minéraux ont été calculés selon cette méthode (Tableau 10). Dans de nombreux cas, les gains de calcium et de potassium dus à la météorisation semblent être du même ordre que ceux dus aux précipitations (Tableau 6).

Il faut toutefois être prudent. La méthode de la couche météorisée donne seulement une idée des éléments libérés par des roches à découvert, c'est-à-dire dans le présent cas par des sols jeunes recouverts de gravier frais. Les quantités d'éléments libérés peuvent être très différentes dans le cas de roches bien couvertes. En outre, le fait que les éléments sont dégagés ne signifie pas nécessairement qu'ils sont utilisables par la végétation.

La méthode de calcul du bilan est fiable lorsque les quantités d'éléments libérés sont calcuées d'après l'écoulement et les arrivées annuelles, étant donné que ces deux facteurs peuvent être mesurés avec une certaine précision. Lorsque le changement annuel net d'un élément dans les plantes et dans le sol est inclus dans le calcul, toutefois, cela signifie qu'il faut estimer les quantités d'éléments à deux moments différents. La variance de chaque estimation peut être élevée, ce qui réduit la fiabilité de l'estimation de la quantité dégagée, à moins que le changement net dans les plantes et dans le sol ne soit élevé. Ces estimations fournissent avant tout un ordre de grandeur. Il est urgent de faire d'autres recherches dans ce domaine afin de fournir des données pour établir des modèles sur les effets des pratiques d'aménagement forestier sur le mouvement des éléments nutritifs.

Le tableau 11 résume les quantités d'éléments pénétrant dans les écosystèmes forestiers en provenance de diverses sources. Il donne aux forestiers une idée de l'ampleur de ces crédits à porter au bilan des éléments nutritifs. Ces facteurs ne peuvent pas être ignorés.

Pertes d'éléments nutritifs

Perte due à la récolte

La récolte conventionnelle de bois rond ne fait qu'enlever les tiges de taille commercialisable, par comparaison à la récolte de l'arbre total au-dessus du sol et à l'exploitation par arbres entiers y compris les racines. Les tableaux 4 et 5 indiquent que la proportion d'azote, par exemple, dans la tige, varie grandement selon l'espèce et l'âge (par exemple 43 % pour un sapin de Douglas de 36 ans, 50 % pour un pin à l'encens de 16 ans, 71 % pour un aulne rouge de 34 ans, 29 % pour un sycomore de 3 ans, et 33 % pour un peuplier hybride d'un an). Les concentrations sont peut-être faibles dans le bois de fût, mais la biomasse est élevée. La biomasse des feuilles est très faible, mais les concentrations élevées d'éléments font que souvent les feuilles contiennent plus d'azote que les tiges (par exemple pour le pin sylvestre, l'épinette blanche, le Cryptomeria japonica). La récolte des tiges, des feuilles et des branches accroît grandement la sortie d'éléments nutritifs par comparaison à la récolte des tiges seulement. Par exemple, d'après le tableau 4 :

	Tige	Tige + branches + feuilles	Accroissement en %
	kg ha^{-1} d'azote		
Sapin de Douglas	125	288	130
Pin à l'encens	115	231	101
Aulne rouge	309	432	40
Sycomore	15	52	247

Dans le cas des bois durs comme l'aulne, le peuplier et le sycomore, il n'est peut-être pas avantageux de récolter les feuilles décidues. Par exemple, si on récoltait un peuplier d'un an avec ses feuilles, la sortie d'azote serait de 192 kg ha^{-1}, alors que cette perte ne serait que de 78 kg ha^{-1} si les arbres étaient récoltés sans leurs feuilles. La même considération s'applique au sycomore (Tableau 4) dont la grande partie de l'azote se trouve dans les feuilles. Par conséquent, la coupe après la chute des feuilles réduit de beaucoup la perte d'azote.

La récolte des racines avec des désoucheuses est maintenant envisagée par certains aménageurs qui tentent d'obtenir le plus de fibres ligneuses possibles de leur forêt, entre autres, pour produire de l'énergie. Cela accroît grandement la perte d'azote. Par exemple (Tableau 4), les racines d'un pin sylvestre de 55 ans contiennent 184 kg ha^{-1} d'azote, par comparaison à 88 kg ha^{-1} dans la tige, et 269 kg ha^{-1} dans la tige, les branches et les feuilles. La récolte des racines, de la tige, des branches et des feuilles entraînerait une sortie d'azote de 453 kg ha^{-1}, soit 417 % de plus que la récolte de la tige et 68 % de plus que la récolte de la tige, des branches et des feuilles. Avant que le désouchage ne soit entrepris sur une vaste échelle, il est recommandé non seulement d'étudier la perte d'éléments nutritifs pouvant en résulter, mais aussi l'effet global de l'exposition du sol minéral.

Les forêts tropicales, particulièrement la forêt ombrophile complexe, sont dans une situation très différente de celle des forêts tempérées parce que les rampants et les feuilles font qu'il est parfois difficile de distinguer entre les éléments des arbres, par exemple la tige et la branche. Au tableau 5, on peut voir que la plus grande partie du potassium et du calcium disponibles se trouvent dans les couches de végétation et de litière. Cela indique la sensibilité de ces forêts à une coupe massive. Les tableaux 4 et 5 montrent la variabilité des éléments nutritifs dans les tiges, les racines, les branches, les feuilles, la litière, le sol, etc., et la difficulté d'en arriver à une conclusion générale concernant la sortie d'éléments nutritifs selon des intensités différentes de récolte.

Les données sur les éléments nutritifs du sol sont difficiles à évaluer. Dans la documentation, certains capitaux d'éléments nutritifs sont présentés comme des totaux et d'autres comme les quantités utilisables ou échangeables. En premier lieu, le

capital d'éléments nutritifs du sol est grandement influencé par la profondeur à laquelle le sol est échantillonné et, bien que "l'échantillonnage à la profondeur d'enracinement" soit un critère couramment utilisé, il est souvent arbitraire. La profondeur d'enracinement de quoi? Des arbres ou de toute la végétation? En outre, les techniques d'évaluation de la disponibilité pour la végétation forestière des éléments nutritifs contenus dans les sols forestiers ne sont pas fiables et ont été conçues pour s'appliquer à l'agriculture. La pédologie forestière est beaucoup en retard par rapport à l'agriculture, et la dynamique du sol constitue souvent le lien le plus faible dans les modèles conçus pour évaluer les répercussions.

Pertes dues au lessivage

L'eau coulant dans le sol d'une forêt selon une certaine direction apporte avec elle à la fois des cations et des anions qui, à moins d'être interceptés, aboutissent dans les cours d'eau et sont perdus pour le système. L'étude de ces pertes a abouti à des résultats qui varient même dans le cas des sites non dérangés. Sur les sites dérangés, la variation est encore plus prononcée.

Ce sont les pertes d'azote qui ont été étudiées de la façon la plus intensive, et Vitousek et Melillo (1979) résument l'état actuel des connaissances à partir des résultats obtenus concernant 18 bassins-versants de forêt tempérée. Les pertes d'azote sous forme de NO_3 varient de 0,05 à 4,5 kg ha^{-1} an^{-1} sur les sites intacts et, sur les sites exploités, selon l'étendue de la coupe, elles vont de 0,6 à 125,5 kg ha^{-1} an^{-1}. Likens et al. (1970) ont observé le niveau très élevé de 125,5 kg ha^{-1} an^{-1} lors de l'enlèvement de la végétation du bassin-versant de Hubbard Brook. La raison de la perte est encore mal comprise, et plusieurs hypothèses ont été proposées pour l'expliquer. De façon générale, il est évident que le fait de déranger la forêt accroît la minéralisation de l'azote et réduit son assimilation par les plantes, au moins pendant un certain temps. L'azote minéralisé en excédent de l'absorption par la plante peut se perdre par lessivage à partir du sol jusqu'aux cours d'eau, sous forme de gaz par la volatilisation de l'ammoniaque, ou sous forme de sortie d'azote et de ses oxydes par suite de la dénitrification. Par ailleurs, l'azote minéralisé peut être retenu à l'intérieur du système en vertu d'une assimilation par les micro-organismes participant à la décomposition de la matière organique, de la fixation des ions d'ammonium sur les surfaces argileuses, et de l'absorption de nitrate sur les colloïdes du sol, et sous l'effet de la sécheresse (Vitousek et Melillo 1979). Toutefois, il est évident que dans certaines circonstances, la perte d'azote due au lessivage peut être égale ou de beaucoup supérieure aux gains d'azote provenant des précipitations (Tableaux 9 et 11) et, si la forêt est dérangée par la coupe, cette perte peut être égale ou supérieure aux pertes dues à la dénitrification.

Pertes dues à la dénitrification

On possède peu de renseignements sur les pertes d'azote gazeux dues à la dénitrification mais Todd, Waide et Cornaby (1975) affirment que pour un écosystème forestier de forêt décidue du sud des États-Unis, ces pertes peuvent être de l'ordre de 10 à 18 kg ha^{-1} an^{-1}. Dans cet écosystème, la perte gazeuse était à peu près identique aux gains dus à la fixation de l'azote (12 kg ha^{-1} an^{-1}). Todd a affirmé que les deux processus ne peuvent être examinés indépendamment; avec la nitrification, ils représentent un cycle d'éléments nutritifs qui laisse très peu de marge. Dans le sud-est des États-Unis, environ 140 kg ha^{-1} an^{-1} d'azote sont recyclés annuellement, de sorte que la fixation de l'azote et la dénitrification représentent chacune environ 10 % de ce total. Il est intéressant de noter que les émissions de N_2O provenant de la dénitrification s'accroissent avec la fertilisation. On soupçonne ce gaz de contribuer à la dégradation de la couche d'ozone qui protège l'homme contre un rayonnement excessif (Delwiche et al. 1978). À n'en pas douter, les forestiers et les agriculteurs entendront parler davantage de cette question à l'avenir.

Pertes dues au feu

Les effets du feu sur le sol peuvent être à court ou à long terme. Il exite beaucoup de renseignements sur les premiers et très peu sur les derniers. Pour obtenir plus de précisions, le lecteur est prié de consulter l'étude de Raison (1979). Ces effets varient selon le type de combustible, le type de feu, la fréquence du feu et la situation écologique. Les effets précis sur le sol de la chaleur, des cendres et de la modification du micro-climat reliés au feu n'ont pas été établis même pour une seule communauté, selon Raison (1979).

La cendre qui tombe au sol est riche en bases (par exemple de 0,3 à 19,1 % de K, de 0,5 à 34,9 % de Ca, de 0,7 à 15,4 % de Mg) et faible en azote (de 0,03 à 1,8 %) et en phosphore (de 0,0004 à 3,1 %). Le pH de la cendre est, comme on peut s'y attendre, très élevé (c'est-à-dire de 6,3 à 12,4) (Raison 1979). Les effets de cette arrivée soudaine de bases influencent nécessairement en profondeur les processus du sol, étant donné que de nombreux micro-organismes sont sensibles au pH. L'azote s'oxyde pendant l'incendie et se perd en grande partie sous forme de gaz. Le système écoforestier perd aussi des bases sous forme de cendres de convection. Les quantités d'éléments perdus et qui se déposent sous forme de cendres varient énormément selon le type de feu et de combustible. Raison (1979) affirme que des dépôts de 26 kg ha^{-1} de P, de 190 kg ha^{-1} de Mg, de 751 kg ha^{-1} de K, et de 1582 kg ha^{-1} de Ca sont assez typiques lorsque des forêts tropicales d'arbres abattus sont brûlées. Les restes partiellement réduits en cendres peuvent accroître les niveaux de carbone et d'azote dans le sol.

La façon dont le feu influence le budget d'éléments nutritifs dépend du site, du sol et du climat. Si les chutes de pluie sont abondantes, le sol bien drainé et la capacité d'échange de

cations faible, on peut prévoir des pertes majeures de bases par lessivage. Dans les régions sèches, le lessivage sera moindre. Les cendres sur les pentes abruptes seront redistribuées ou entraînées par les précipitations dans les cours d'eau et perdues s'il y a de fortes chutes de pluie. Les répercussions du feu sur le cycle des éléments nutritifs ont le plus d'ampleur lorsque la plupart des éléments nutritifs de l'écosystème sont dans la végétation et dans la litière feuillue ou là où il y a peu de réserves d'azote. Toutefois, il n'est pas possible de généraliser, et il faut examiner chaque feu et chaque site séparément aux fins du budget d'éléments nutritifs.

Effets de la récolte et de l'aménagement intensifs sur les budgets d'éléments nutritifs

Les détails fournis dans les pages précédentes concernant le capital, les gains et les pertes en éléments nutritifs visent à illustrer la grande variabilité de ces données. Il est aussi évident que pour évaluer les répercussions de la récolte sur l'équilibre des éléments nutritifs (pertes ou gains), il ne suffit pas d'évaluer simplement la perte des éléments nutritifs contenus dans le bois retiré de la forêt et de la comparer aux gains d'éléments provenant des précipitations et au capital d'éléments nutritifs comme le font bien des personnes qui ne sont pas des écologistes. Il y a d'autres sources de revenus et de pertes appréciables en éléments. Certains processus, particulièrement la fixation de l'azote et la dénitrification, sont sensibles au pH du sol et à d'autres caractéristiques, et varient énormément d'un site à l'autre. Il n'est tout simplement pas possible de faire des généralisations concernant les répercussions de différentes techniques d'aménagement et de récolte. La prolifération des facteurs fait qu'il peut être profitable d'adopter une approche intégrale et d'élaborer des modèles conçus pour évaluer les répercussions de paramètres différents et changeants sur des situations particulières. Les effets sont propres à chaque site et à chaque élément. Par bonheur, les facteurs en question, et le type de renseignement requis pour faire fonctionner les modèles, sont connus. Malheureusement, la pédologie forestière est si en retard par rapport à la pédologie agricole que la plupart des données sur les processus disponibles à l'heure actuelle concernent l'agriculture. Il y a de sérieuses lacunes dans nos connaissances sur la disponibilité des éléments nutritifs, la fixation de l'azote, les processus de dénitrification et nitrification, l'activité des micro-organismes du sol et d'autres processus intéressant le sol forestier. Les forestiers doivent aussi regarder au-delà du simple budget d'éléments nutritifs. Les pertes peuvent paraître faibles par comparaison au capital d'éléments nutritifs du système, mais être considérables par rapport à la proportion de ce capital participant activement à la dynamique et au cycle forestier.

Nous avons encore tendance à recourir à la méthode de la "boîte enregistreuse", en ce sens que nous en savons beaucoup sur ce qui entre et ce qui sort de la forêt, mais très peu sur ce qui

se passe entre les deux. L'une des difficultés provient du fait qu'il est souvent ardu de définir exactement ce que nous voulons savoir. L'effet de l'aménagement forestier sur quel paramètre? Sur la fertilité du sol? Que voulons-nous dire par "fertile"? Fertile par rapport à quoi? Devrions-nous viser à maintenir le statut quo en matière de productivité du sol de sorte que ce dernier puisse soutenir une forêt semblable après la taille? Ou devons-nous améliorer la productivité du sol de façon à soutenir un différent type de forêt, avec des rendements supérieurs aux rendements précédents? En outre, comment pouvons-nous décider qu'une technique d'aménagement est bonne ou mauvaise? Si la récolte enlève une plus grande quantité d'un élément qu'il ne peut en entrer dans le système avant la récolte suivante, jusqu'où cette perte demeure-t-elle acceptable? Ou devons-nous adopter une attitude selon laquelle toute perte nette est synonyme de mauvaise administration des ressources? Si la réponse est oui, que faire à ce sujet?

La réponse à la plupart de ces questions se situe au niveau des objectifs d'aménagement. À condition que ces objectifs intègrent une dimension environnementale, c'est à l'aménageur de décider quel type de forêt il veut, quelles répercussions lui paraissent acceptables et combien il peut dépenser pour redresser une situation défavorable. Le forestier ferait aussi bien d'aligner ses objectifs environnementaux sur ceux de la société, ou il peut s'attendre à des conflits et à l'imposition de restrictions supplémentaires à l'aménagement. L'aménageur devrait comprendre les principes écologiques de base ou être prêt à écouter les gens qui les comprennent.

Pendant de nombreuses années, les éléments nutritifs ont été au centre de l'attention, mais les pertes de bois signifient des pertes de carbone pour le système, et le dérangement du sol réduit aussi le niveau de matières organiques dans celui-ci. La matière organique du sol est vitale pour le bien-être des forêts, et les lacunes dans notre connaissance du cycle du carbone recevront sûrement plus d'attention. Les pertes globales de matière organique du sol, particulièrement dans les régions d'agriculture intensive, contribuent fortement à l'accroissement du niveau de gaz carbonique dans l'atmosphère tout en pouvant avoir des répercussions sur le climat. Si les sols forestiers perdent de la matière organique sur une grande échelle, les répercussions du niveau de gaz carbonique dans l'atmosphère pourraient être considérables.

Les renseignements les plus détaillés possibles concernant le mouvement d'éléments nutritifs par suite de diverses pratiques d'aménagement forestier concernent principalement les forêts de feuillus des zones tempérées. Ces forêts croissent toutefois sur des sols relativement fertiles, par comparaison avec les sols forestiers infertiles de la région boréale. Ce qu'il nous faut examiner de façon urgente, ce sont les effets de l'aménagement sur des sols forestiers si sensibles.

Chaque fois que l'homme retire quelque chose de la forêt, y introduit quelque chose, piétine le sol ou le rend compact par l'utilisation de machines, cela entraîne des répercussions. Nous pouvons deviner quelques-unes de ces répercussions, mais nous savons peu de chose des autres. Certains effets peuvent avoir une importance minime ou même être éphémères, mais d'autres pourraient avoir des conséquences majeures. La compréhension de ces effets constitue un défi majeur pour les spécialistes des sciences forestières qui, avec l'aide des aménageurs, pourrait fournir les renseignements de base requis pour s'assurer que nos forêts seront léguées aux générations futures dans un état aussi bon ou meilleur que leur état actuel.

Remplacement des éléments nutritifs perdus

S'il a été démontré que le système écoforestier perd des éléments nutritifs à un rythme inacceptable pour l'aménageur, ou qu'il se produit des modifications indésirables du pH, de la capacité d'échange d'ions, ou du niveau de matière organique, le problème consiste à trouver la façon de remédier à cette situation. De nombreux forestiers ont tendance à adopter une attitude simpliste à l'égard des pertes d'éléments nutritifs et à affirmer "Nous pouvons facilement remplacer les pertes par la fertilisation"; or, cette attitude n'est pas nécessairement correcte. Pour que les fertilisants soient efficaces, ils doivent être du même type, en quantité voulue et ajoutés au bon moment. Même lorsque toutes ces conditions sont satisfaites, si le sol ne possède pas les capacités voulues d'échange d'ions pour retenir les ions dans le système, il y aura une perte considérable d'éléments fertilisants. De plus, la sortie d'ions comme le nitrate pourrait entraîner la pollution de cours d'eau. Outre ces problèmes, il y a celui, prépondérant, de la disponibilité des fertilisants et de leur coût aux points de vue financier et énergétique. Les fertilisants azotés produits selon le procédé Haber-Bosch nécessitent beaucoup d'énergie, et l'agriculture entre en compétition pour obtenir ces fertilisants qui deviennent de plus en plus rares chaque année. On a prédit des pénuries mondiales de fertilisants au phosphore. Alors les forestiers pourraient éprouver de la difficulté à remplacer les pertes d'azote et de phosphore par des fertilisants. Les bases causent moins de problèmes; on peut ajouter par exemple le calcium dans une application de pierre à chaux, mais ici encore il y a des coûts de transport et d'épandage.

Au cours des années récentes, il y a eu un regain d'intérêt à l'égard du maintien de la fertilité du sol forestier par des moyens biologiques. La fixation de l'azote, par exemple par les légumes et par la symbiose de non légumineuses, peut enrichir le sol à un taux excédant de beaucoup les gains d'azote dus aux précipitations. Les bactéries indépendantes fixatrices d'azote et les cyanophycées dans le sol ont une réserve limitée d'énergie et fixent des quantités relativement faibles d'azote. Il semble toutefois que la fixation de l'azote s'effectue dans de nombreuses niches de l'écosystème forestier, par exemple chez les lichens, sur les feuilles, sur les billes en pourriture et dans

la rhyzosphère de la végétation, tout à fait à part des symbioses entre les racines et les micro-organismes (Fortin 1979). Lorsque ces sources d'azote se conjuguent, elles constituent un apport annuel considérable de cet élément. La fixation de l'azote peut être favorisée si on procède à l'inoculation et si on fournit des substrats favorables à l'activité des micro-organismes une fois que l'on connaîtra davantage les processus et les organismes en question. Il est possible d'exploiter la symbiose fixatrice d'azote d'arbres et d'arbustes ne faisant pas partie de la famille des légumineuses comme l'aulne (esp. Alnus) pour augmenter l'apport d'azote et fournir au sol de la matière organique, même si les problèmes de concurrence et de régularisation demeurent toujours sans solutions.

Dans les systèmes où l'on adopte des intervalles d'exploitation courts ou des mini-intervalles, les pertes relativement élevées d'éléments nutritifs qui se produisent ressemblent à celles de l'agriculture. Il peut être nécessaire de recourir à des techniques agricoles pour maintenir la fertilité du sol, par exemple faire pousser des légumes sur le site avant, pendant ou après la plantation afin de maintenir les niveaux d'azote et de matière organique du sol, ainsi que d'accroître la capacité d'échange d'ions. Les forestiers peuvent avoir à envisager la récolte alternative de conifères et de feuillus. Par exemple, le tremble (esp. Populus), lorsqu'il a la possibilité de demeurer sur le site entre les intervalles d'exploitation de pin ou s'il est mélangé à des pins (esp. Pinus), est susceptible d'avoir des effets bénéfiques sur le sol. Dans ces circonstances, il y a un apport accru de matières organiques facilement décomposables qui libèrent des éléments nutritifs tout en améliorant la capacité d'échange d'ions. Il faut explorer la possibilité de faire pousser des arbres par espèces mélangées afin de produire des fibres et de maintenir simultanément la fertilité du sol.

Les forestiers voudront aussi que leurs arbres tirent le meilleur profit possible des éléments nutritifs disponibles. Il est possible de choisir et de multiplier des arbres plus aptes que d'autres à assimiler les éléments nutritifs, mais ils devront avoir d'autres caractéristiques souhaitables, par exemple bien pousser, avoir une belle forme, une bonne résistance aux insectes nuisibles et une certaine rusticité. La multiplication d'arbres possédant ces caractéristiques multiples n'est pas une mince tâche. L'assimilation d'éléments nutritifs peut être améliorée grâce à des associations avec des mycorhizes. Ces derniers peuvent accroître l'assimilation du phosphore, lorsqu'il est sous une forme difficilement utilisable, par les champignons agissant comme prolongements des racines avec une superficie beaucoup plus grande capable d'augmenter les gradients de diffusion de phosphore. Est-il possible d'exploiter ce processus afin d'améliorer le rendement? Il y a de nombreux outils biologiques dont le forestier peut se servir pour réduire les besoins en fertilisants. Avant qu'il puisse le faire, toutefois, il faudra

en savoir bien davantage sur les processus du sol et sur les micro-organismes concernés.

Les forestiers devront accepter le fait que le maintien de la fertilité du sol par des moyens biologiques sera coûteuse sur le plan économique. La culture par alternance de feuillus de faible valeur et de conifères de valeur, ou l'abandon de sites pendant quelques années sous la luzerne entre les mini-intervalles d'exploitation des arbres, pourront entraîner une perte temporaire de production de bois. Toutefois, l'amélioration de la fertilité du sol permettra peut-être de récupérer cette perte à long terme. Dans ses analyses des coûts et avantages, le forestier devra regarder au-delà des revenus tirés du bois, et inclure les gains réalisés au niveau de la productivité du sol.

EFFETS GÉNÉTIQUES

L'utilisation et l'aménagement intensifs de la forêt en affectent tous deux la constitution génétique. La tendance à choisir des arbres supérieurs ou à produire de nouveaux génotypes pour les utiliser dans les plantations signifie aussi que de nouveaux types génétiques sont introduits dans les sites d'anciennes forêts naturelles. Ces nouveaux types peuvent s'hybrider avec des espèces naturelles locales, une évolution qui peut avoir des effets nuisibles. Si les génotypes naturels ont une certaine une certaine valeur, des mesures seront prises pour préserver leur intégrité génétique en restreignant la plantation aux génotypes locaux choisis.

L'utilisation de clones génétiquement supérieurs se répand de plus en plus en foresterie intensive de feuillus, et les techniques de culture de tissu pourront un jour permettre l'utilisation de clones de conifères. Le danger posé par une forêt de clones provient de l'absence possible chez celle-ci de la variabilité et de la souplesse nécessaires pour faire face aux insectes nuisibles et aux maladies, ou aux conditions climatiques extrêmes expérimentées pendant un intervalle d'exploitation. Les forestiers devront être guidés par les généticiens pour éviter de recourir à une base génétique trop étroite.

L'exploitation forestière peut aussi avoir des effets nuisibles. Dans de nombreuses parties du monde, il y a eu exploitation du bois de première qualité dans les forêts naturelles par la coupe sélective des arbres possédant les meilleures caractéristiques de croissance et la plus belle forme. Le rythme de croissance est régularisé par de nombreux gènes, et il faut faire une sélection très poussée pour modifier les caractéristiques moyennes de croissance de toute une population d'arbres. Les répercussions de la coupe du bois de première qualité sur une population varient selon la taille de celle-ci et sa variabilité. Les coupes rases sur de vastes étendues et les coupes axées sur des espèces individuelles de valeur sont

susceptibles d'avoir plus de répercussions sur la constitution génétique des populations que la coupe du bois de première qualité. Déjà, de nombreuses espèces d'arbres de valeur sont menacées de dégradation génétique à la fois dans les zones tempérées et les zones tropicales. Le forestier doit considérer le maintien de la diversité et de l'intégrité génétiques dans ses plans d'aménagement comme partie intégrante d'une bonne administration des ressources.

L'utilisation accrue d'espèces d'arbres introduites par l'homme a amené ses propres problèmes d'interaction entre les insectes nuisibles et les plantes hôtes. Les arbres indigènes peuvent ne pas être capables de résister aux insectes nuisibles et aux maladies introduites dans le milieu. Par ailleurs, les espèces introduites peuvent être sensibles aux insectes nuisibles et aux maladies indigènes.

EFFETS SOCIO-ÉCONOMIQUES

La production, la vente et la fabrication de produits du bois créent des revenus et de l'emploi. Ces activités ont une grande portée socio-économique. L'accent mis sur la foresterie intensive accroîtra la mécanisation de l'aménagement et de la récolte, ce qui entraînera une diminution de l'emploi dans le secteur primaire des ressources. Inversement, le nombre d'emplois peut augmenter dans les industries secondaires concernées par la fabrication de produits à base de bois. La foresterie intensive coûte cher, et nous pouvons nous attendre à une augmentation des coûts de production du bois qui sera transmise aux fabricants et, en définitive, au public. Les forces du marché décideront en définitive du caractère acceptable ou non de ces changements de prix. La production accrue de fibres de bois renouvelables à usage polyvalent est plus susceptible de profiter à la société si les biens sont fabriqués dans le pays d'origine, si cette production tient compte des répercussions sur l'environnement, et si elle n'entre pas trop en conflit avec d'autres besoins sociaux comme l'alimentation et l'approvisionnement en eau. En outre, il est important que les avantages retirés soient transmis à la société soit directement, soit indirectement.

L'accroissement de la récolte et des exportations peut accroître les profits industriels, augmenter le produit national brut, améliorer la balance des paiements et constituer un avantage économique véritable. Cela ne signifie pas nécessairement qu'il y aura un accroissement de la prospérité et du bien-être du peuple. Ce paradoxe apparent est illustré par Westoby (1979) lorsqu'il décrit les effets de l'industrie du bois de feuillus dans les tropiques. Entre 1950 et 1976, la coupe de bois de feuillus dans les tropiques a quadruplé et les exportations annuelles de billes provenant de pays relativement pauvres dans cette région vers les pays riches sont passées de 3 millions m^3 à 40 millions m^3, fournissant des revenus considérables aux

pays d'origine. En même temps, le traitement de ces mêmes billes dans les pays d'origine a subi un déclin, privant ainsi ces nations de 2 milliards de dollars ou plus et de plusieurs centaines de milliers d'années-personnes d'emploi (Pringle 1976).

L'industrie forestière dans les pays moins avancés est souvent placée sous mainmise étrangère et largement axée sur l'exportation. Fréquemment, l'exploitation s'y fait de façon non ordonnée et l'aménagement est minimal, "des petits fermiers, des agriculteurs chez lesquels le roulement est élevé, et des pauvres fermiers sans terres suivent les bûcherons (Westoby 1979). Plus de la moitié de la forêt tropicale humide originale est disparue de l'Afrique, un tiers de ce type de forêt en Amérique latine et plus de deux cinquièmes en Asie selon Sommer (1976) et Westoby (1979). Cette exploitation du bois de feuillus dans les tropiques peut comporter des gains économiques à court terme, mais la partie réinvestie en foresterie ou utilisée pour améliorer les conditions de vie des habitants des pays d'origine est relativement faible. Comme l'affirme Westoby (1979), en parlant des tropiques, "rares sont les pays où les forestiers ont consacré leur énergie à aider le paysan à développer le type de foresterie qui améliorerait son bien-être matériel". (traduction) Il y a bien sûr des exceptions, mais les pauvres dans de nombreux pays continuent à avoir désespérément besoin de combustibles, de matériaux de construction, de meubles à prix modique et de papier en dépit d'une exploitation accrue de la forêt. Les coûteux produits à base de bois importés par les pays fournisseurs de bois en provenance des pays riches dépassent les moyens de la plupart des citoyens. À un degré beaucoup moindre, cette situation se produit même dans le commerce entre les pays riches, bien que ces derniers soient mieux en mesure de payer les coûteux biens manufacturés importés, et orientent certaines parties des profits de l'exploitation forestière vers le renouvellement et l'aménagement de la forêt, et la recherche forestière.

L'utilisation de la forêt pour produire de l'énergie (combustibles liquides, essence, etc.) pourrait être très avantageuse pour certaines collectivités isolées où le coût des combustibles fossiles et de l'électricité est élevé. La forme des arbres utilisés pour produire de l'énergie n'a pas d'importance, de sorte que l'on pourrait bien passer de l'exploitation exclusive des forêts dont les arbres ont la tige bien formée à l'inclusion d'arbres courbés, rabougris. Cela pourrait signifier que les forêts dégradées et les scrubs forestiers de toutes sortes pourraient être récupérés pour la production d'énergie. Dans les circonstances, il est sûr que des problèmes de conservation se poseront. Certaines forêts présentant un intérêt écologique n'ont survécu que parce que leur forme peu intéressante constituait une dissuasion à l'exploitation forestière.

Les forêts seront soumises à de fortes pressions, particulièrement dans les tropiques, si l'on utilise beaucoup le bois pour produire du carburant et du combustible pour le transport et pour les machines fixes. Les conséquences politiques et socio-économiques seront très importantes. Les forêts seront fortement menacées par la dégradation.

CONCLUSIONS

1. Le monde a besoin de plus de ressources ligneuses renouvelables, d'installations de loisirs dans les forêts, de réserves fauniques et forestières et de parcs, d'un volume plus important de biomasse pour la production de combustible liquide, d'aliments pour le bétail et de produits chimiques, et de grandes étendues de forêt pour la protection des bassins-versants. Certaines utilisations sont conflictuelles. Par exemple, la société a maintenant tendance à exiger davantage de produits forestiers, mais, étant donné les autres utilisations faites de la forêt et l'opinion d'un public conscient de l'importance des questions environnementales, les forestiers sont obligés de couper moins de bois. La conséquence manifeste de cette situation est une pression accrue sur les ressources forestières, et sur les forestiers.

2. La production des forêts naturelles est souvent faible, et des efforts sont faits pour élaborer des systèmes forestiers hautement productifs en recourant à des génotypes supérieurs, à un aménagement intensif, à la mécanisation, à l'exploitation par arbres entiers et à de courts intervalles de rotation. Ces systèmes, tout en étant potentiellement très productifs, soumettent le sol à des exigences plus grandes. Les considérations environnementales dicteront probablement jusqu'à quel point il sera possible de pousser ces techniques intensives, et l'évaluation des répercussions sur l'environnement devrait faire partie des plans d'aménagement forestier. Les connaissances actuelles sur les processus en cours dans le sol forestier, et les techniques grossières utilisées aujourd'hui pour évaluer l'équilibre nutritif sont incapables de répondre aux besoins futurs de l'évaluation des répercussions sur l'environnement.

3. Par le passé, les évaluations économiques de la foresterie ont eu principalement un caractère économique plutôt que socio-économique. On a actuellement tendance à tenir compte des questions sociales au cours de la planification forestière, mais jusqu'ici cela n'a eu qu'un faible impact, particulièrement dans les tropiques. Les forestiers doivent planifier et évaluer la gestion et l'utilisation en se plaçant sur le plan socio-économique de façon que de plus nombreuses couches de la société profitent des activités forestières.

4. En dépit d'une grande productivité primaire, de nombreuses forêts tropicales sont sensibles à l'enlèvement de la végétation, au brûlage et à d'autres formes de perturbation. Déranger ces forêts et les convertir sur une vaste échelle en mono-cultures hautement productives pourrait avoir de graves conséquences à long terme. Il faut de toute urgence évaluer l'efficacité de cette conversion sur la productivité à long terme du site.

5. Le remplacement des pertes d'éléments nutritifs par les fertilisants est coûteux à la fois en termes d'énergie et d'argent, et entraîne souvent un certain gaspillage à cause du lessivage massif des éléments solubles dans les cours d'eau. Il faut élaborer des techniques biologiques permettant de maintenir la fertilité du sol. Le recours à la fixation de l'azote, les cultures par alternance, le recours à des mélanges d'arbres et d'arbustes, et l'adoption de mesures destinées à favoriser les mycorhizes sont des techniques comportant toutes des possibilités intéressantes.

6. Pour que les forestiers puissent gérer leurs forêts de façon à répondre aux besoins de la société et à tenir compte des répercussions sur l'environnement, les écoles de foresterie devront fournir un meilleur enseignement en ce qui concerne les principes de la pédologie et de l'écologie foretières, et accorder une plus haute priorité à la recherche sur les sols forestiers.

7. Il n'est pas possible de dire, en général, si les courts intervalles d'exploitation et l'exploitation par arbres entiers sont inoffensives ou au contraire dangereuses. Les effets des intervalles d'exploitation et de diverses intensités de récolte sur les niveaux d'éléments nutritifs varient selon le site, l'espèce et l'élément. Les facteurs en jeu sont hautement variables.

8. Il faut de toute urgence adopter des modèles d'aménagement forestier intégraux. Ces modèles devraient tenir compte de tous les éléments des gains et des pertes en éléments nutritifs, d'un capital effectif en éléments nutritifs, du cycle du carbone, du rythme de décomposition et de passage d'un cycle à un autre, et des effets sur les niveaux de matières organiques, la capacité d'échange d'ions, et d'autres caractéristiques du sol.

9. Il existe peu de renseignements fiables concernant les processus de décomposition du sol, la nitrification, la dénitrification, la fixation de l'azote, et l'activité des micro-organismes dans la plupart des régions du monde, particulièrement dans les tropiques. Cette information est nécessaire afin de rendre les modèles d'aménagement plus efficaces.

10. Il nous faut élaborer une éthique d'administration forestière responsable à partir de laquelle seront établis des principes et des objectifs d'aménagement visant à satisfaire les besoins en bois de la société, à maintenir la productivité et le potentiel biologiques du sol, à maintenir l'intégrité génétique de la végétation forestière et de la faune connexe, et à rendre viables au point de vue socio-économique l'aménagement et l'utilisation de la forêt.

BIBLIOGRAPHIE

Abrahamsen, G.; Hornvedt, R.; Tveite, B. 1976. Impacts of acid rain on coniferous forest ecosystems. Pages 991-1010 in 1st. Symp. on Acid Precipitation and the Forest Ecosystem. USDA For. Serv. Tech. Rep. NE-23.

Adams, M.R. 1979. Energy supply and fuel manufacture and processing. Pages 1-58 in Proc. Symp. Utilization of Alternative Fuels for Transportation. Univ. Santa Clara, Calif., 1978. AIAA Aerospace Assessment Series 2.

Alban, D.H.; Perala, D.A.; Schlaegel, B.E. 1978. Biomass and nutrient distribution in aspen, pine, and spruce stands on the same soil type in Minnesota. Can. J. Forest. Res. 8: 290-299.

Andren, E.S.; Elder, F. 1977. Atmospheric loadings to Great Lakes. Univ. Windsor. 16 p.

Belanger, R.P.; Saucier, J.R. 1975. Intensive culture of hardwoods in the south. Iowa State J. Res. 49(3), Pt. 2: 329-334.

Berger, J.E. 1979. Storage and distribution of Synthetic Fuels. Pages 69-78 in Proc. Symp. on Utilization of Alternative Fuels for Transportation. Univ. Santa Clara, Calif., 1978. AIAA Aerospace Assessment Series 2.

Birkeland, P.W. 1973. Use of relative age-dating methods in a stratigraphic study of rock glacier deposits. Mt. Sopris, Colorado. Arct. Alp. Res. 5(4): 401-416.

Birkeland, P.W. 1974. Pedology, Weathering, and Geomorphological Research. Oxford Univ. Press, New York, London and Toronto. 285 p.

Bond, G. 1967. Fixation of nitrogen by higher plants other than legumes. Ann. Rev. Plant Physiol. 18: 107-126.

Brouzes, R.; Lasik, J.; Knowles, R. 1969. The effect of organic amendment, water content, and oxygen on the incorporation of $^{15}N_2$ by some agricultural and forest soils. Can. J. Microbiol. 15: 899-905.

Burns, R.C.; Hardy, R.W. 1975. Nitrogen fixation in bacteria and higher plants. Springer Verlag, New York. 189 p.

Carlisle, A.; Methven, I.R. 1979. The environmental consequences of intensive forestry and the removal of whole trees. Biological and Sociological Basis for a Rational Use of Forest Resources for Energy and Organics. Pages 108-120 in Proc. MAB Internat. Wkshp. Michigan State Univ. May 1979.

Carroll, D. 1962. Rainwater as a chemical agent in geological processes - a review. Geol. Survey Water Supply Paper 1535-G. 18 p.

Clayton, J.L. 1979. Nutrient supply to soil by rock weathering. Pages 49-62 in Proc. Symp. Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling. Coll. Environ. Sci., State Univ. New York. Syracuse, N.Y. 1979.

Cleaves, T.; Fisher, D.; Bricker, O.P. 1974. Chemical weathering of serpentinite in the eastern Piedmont of Maryland. Geol. Soc. Amer. Bull. 85: 437-444.

Cleaves, E.T.; Godfrey, A.; Bricker, O.P. 1970. Geochemical balance of a small watershed and its geomorphic implications. Geol. Soc. Amer. Bull. 81: 3015-3032.

Cole, D.W.; Gessel, S.P.; Dice, S.F. 1967. Distribution of cycling of nitrogen, phosphorus, potassium and calcium in a second-growth Douglas-fir ecosystem. Amer. Assoc. Adv. Sci. 13th Annual Meetg. Dec. 1967. New York: 197-232.

Colman, S.M. 1977. The Development of Weathering Rinds on Basalts and Andesites, and their use as a Quarternary Dating Method, Western United States. Ph.D. thesis. Univ. Colorado, Boulder.

Cornaby, B.W.; Waide, J.B. 1973. Nitrogen fixation in decaying chestnut logs. Plant and Soil 39: 445-448.

De Bell, D.S.; Strand, R.F.; Reukema, D.L. 1978. Short rotation production of red alder: some options for future forest management. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-70. Utilization and management of alder. Pages 231-244 in Proc. Symp., Ocean Shores, Washington. April 1977.

Delwiche, C.C.; Bissel, S.; Virginia, R. 1978. Soil and other sources of nitrous oxide. Pages 459-522 in Nitrogen in the Environment. Academic Press, New York.

Denison, R.; Caldwell, B.; Bormann, B.; Edred, L.; Swanberg, C.; Anderson, S. 1976. Effects of acid rain on nitrogen fixation in Washington Coniferous Forests. Pages 933-950 in Proc. 1st Internt. Symp. on Acid Precipitation and the Forest Ecosystem. USDA For. Serv. Tech. Rep. NE-23.

Ek, A.R.; Dawson, D.H. 1976. Actual and projected growth and yields of Populus tristis No. 1 under intensive culture. Can. J. Forest Res. 6: 132-144.

Fisher, D.W.; Gambel, A.W.; Likens. G.E. 1968. Atmospheric contributions to water quality of streams in the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. Water Resources Res. 4(4-6): 1115-1126.

Fölster, H.; de Las Salyas, G.; Khanna, P. 1976. A tropical evergreen forest site with perched water table, Magdalena Valley, Colombia. Biomass and bioelement inventory of primary and secondary vegetation. Oecol. Plant. 11(4): 297-320.

Fortin, J.A.; Lavallée, R.; Piché, Y. 1979. Forest utilization for energy and the role of nitrogen fixation: a literature review. ENFOR Contract Report, Project P-9. Envir. Can., Can. For. Serv. 166 p.

Fredriksen, R.L. 1972. Nutrient budget of a douglas-fir forest on an experimental watershed in Oregon. Pages 115-131 in Proc. Symp. Research on Coniferous Forest Ecosystems. Bellingham, Washington.

Frison, G. 1967. Asportazioni minerali nel barbatellaio di pioppo. Cellulosa e Carta 18(12): 10-24.

Granhall, U.; Lindberg, T. 1978. Nitrogen fixation in some coniferous forest ecosystems. Pages 178-192 in Environmental Role of Nitrogen-fixing Blue Green Algae and Asymbiotic Bacteria. Ecol. Bull. (Stockholm) 26: 178-192. See also Swedish Coniferous Forest Project (SWECON) Tech. Rep. 11. 1978.

Gratch, S. 1979. Outlook for performance of alternative fuels in automobiles. Pages 85-92 in Proc. Symp. on Utilization of Alternative Fuels for Transportation. Univ. Santa Clara, Calif., 1978. AIAA Aerospace Assessment Series 2.

Greenland, D.J.; Kowal, J.M. 1960. Nutrient content of moist tropical forest of Ghana. Plant and Soil 12: 154-174.

Harada, H.; Sato, H.; Hotta, I.; Hatiya, K.; Tadaki, Y. 1972. Study on the nutrient contents of mature Cryptomeria forest. Bull. Govt. Forest Expt. Sta., Tokyo. 249: 17-74.

Henriksson, E. 1971. Algal nitrogen fixation in temperate regions. Plant and Soil. Special Volume: 415-419.

Herrera, R.; Jordan, C.F. 1981. Nitrogen cycle in a tropical Amazonian rain forest: The coating of a low mineral nutrient status. Pages 493-505 in Clark, F.E.; Rosswall, T. eds. 1981. Terrestrial Nitrogen Cycles. Ecol. Bull. (Stockholm) 33.

Jeffries, D.S. 1978. Precipitation loadings for Muskoka, Haliburton. pers. comm. Aug. 22, 1978. 1 p.

Jones, K. 1970. Nitrogen fixation in the phyllosphere of Douglas-fir. Ann. Bot. 34: 239-244.

Jones, K. 1976. Nitrogen-fixing bacteria in the canopy of conifers in a temperate forest. Pages 451-463 in Dickson, C.H.; Preece, T.F.; Microbiology of Aerial Plant Surfaces. Also in Fortin et al. 1979.

Jordan, C.F. 1979. The environmental consequences of intensive forestry and the removal of whole trees from forests: the situation in Latin America. Pages 141-148 in Proc. MAB Intern. Wkshp. Biological and Sociological Basis for Rational Use of Forests for Energy and Organics. Michigan State Univ. May 1979.

Kato, H.; Tadaki, Y.; Ogawa, H. 1974. Plant biomass and growth increment studies. Pages 12-18 in Mimeo. Rep. IBP synthesis-meeting, Kuala Lumpur. August 1974.

Likens, G.E.; Bormann, F.H.; Johnson, N.M.; Fisher, D.W.; Pierce, R.S. 1970. Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. Ecol. Mon. 40: 23-47.

Likens, G.E.; Bormann, F.H.; Pierce, R.S. 1971. Nutrient-hydrologic cycle interaction in small forested watershed-ecosystems. Productivity of Forest Ecosystems. Pages 553-563 in Duvigneaund, P. ed. Proc. UNESCO and IBP Symp., Brussels. Oct. 1969.

Likens, G.E.; Bormann, F.H.; Pierce, R.S.; Eaton, J.S.; Johnson, N.M. 1977. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. Springer-Verlag, New York. 146 p.

Lugo, A. et al. 1973. Tropical ecosystem structure and function. Pages 67-111 in Farnworth, E.; Golley, F. eds. Fragile Ecosystems. Springer Verlag, New York. Also in Jordan, C.F. 1979 loc. cit.

Marchand, D.E. 1971. Rates and modes of denudation, White Mountains, eastern California. Amer. J. Sci. 270: 109-135.

Mayer, R.; Ulrich, B. 1974. Conclusions on the filtering actions of forests from ecosystem analysis. Oecol. Plant. 9: 157-168.

Miller, H.G. 1979. The nutrient budgets of even-aged forests. Pages 221-256 in Ford, E.D. et al. eds. The Ecology of Even-Aged Forest Plantations. Proc. Meetg. Divis. 1, IUFRO, Edinburgh, Sept. 1978.

Miller, H.G.; Cooper, J.M.; Miller, J.D. 1976. Effect of nitrogen supply on nutrients in litter fall and crown leaching in a stand of Corsican pine. J. Appl. Ecol. 13: 233-248.

Murphy, P.G. 1975. Net primary productivity in tropical terrestrial ecosystems. Pages 217-231 in Lieth, H.; Whittaker, R. eds. Primary productivity of the Biosphere. Springer Verlag, New York.

Nihlgård, B. 1972. Plant biomass, primary production and distribution of chemical elements in a beech and a planted spruce forest in South Sweden. Oikos 23: 69-81.

Overrein, L.N. 1976. A presentation of the Norwegian project. Acid precipitation - effects on forest and fish. Pages 37-42 in Proc. 1st Internat. Symp. on Acid Precipitation and the Forest Ecosystem. USDA For. Serv. Tech. Rep. NE-23.

Ovington, J.D. 1962. Quantitative ecology and the woodland ecosystem concept. In Cragg, J.B. ed. Adv. Ecol. Res. 1: 103-192.

Pearson, F.J., Jr.; Fisher, W. 1971. Chemical composition of atmospheric precipitation in the northeastern United States. Geol. Survey Water Supply Paper 1535-P. 23 p.

Pfeiffer, W.C. 1979. Economic potentials of hybrid poplar-based fibre production as an agricultural enterprise in eastern Ontario. School of Agric. Econom. and Extension Educ. Univ. Guelph and Timber Sales Branch, Ontario Min. Nat. Res. 50 p.

Pringle, S.L. 1976. Tropical moist forests in world demand, supply and trade. Unasylva 28(112-113): 106-118.

Pritchett, W.L. 1979. Soil as a reservoir: soil nutrient supplies and mobilization rates. Pages 49-62 in Proc. Symp. Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling. Coll. Envir. Sci., State Univ. New York. Syracuse, New York, 1979.

Raison, R.J. 1979. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: a review. Plant and Soil 51: 73-108.

Raitanen, W.E. 1978. Energy, fibre and food. Agriforestry in Eastern Ontario. 8th World Forest. Congr., Jakarta. Oct. 1978. FFF/7-16. 13 p.

Reed, F.L.C. and Associates Ltd. 1973. Forest Management in Canada. Vol. 1. Can. Dept. For., Forest Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-102, Ottawa. 155 p.

Rennie, P.J. 1978. Notes on NATO Advance Research Institute. Effects of acid rainfall on terrestrial ecosystems and 3rd Ann. Meetg., Can. Land. Reclam. Assoc. 1 and 2. Can. For. Serv.

Sanderson, M. 1977. Agricultural watershed studies, Great Lakes drainage basin, Canada. Task Group C, Activity 1, Project 6. Univ. Windsor. 2 p.

Schindler, D.W. 1976. Natural waters and chemical budgets for small Pre-Cambrian lake basin in central Canada. J. Fish. Res. Bd. Can. 38(1): 2526-2543.

Sommer, A. 1976. Attempt at an assessment of the world's tropical moist forests. Unasylva (112-113): 5-25.

Steinbeck, K.; May, J.T. 1971. Productivity of very young Platanus occidentalis L. plantings grown at various spacings. Forest Biomass Studies. Life Sci. Agric. Exp. Sta., Univ. Maine, Orono. Misc. Publ. No. 132.: 153-162.

Timmer, V. 1981. Impact of intensive harvesting on forest nutrient budgets in the Nipigon area. Fac. For., Univ. of Toronto. 29 p.

Todd, R.L.; Meyer, R.D.; Waide, J.B. 1978. Nitrogen fixation in a deciduous forest in the southeastern United States. Environmental Role of Nitrogen-fixing blue green algae and asymbiotic Bacteria. Ecol. Bull. (Stockholm) 26: 172-177.

Todd, R.L.; Waide, J.B.; Cornaby, B.W. 1975. Significance of biological nitrogen fixation and denitrification in a deciduous forest ecosystem. Pages 729-735 in Howell, F.G.; et al. eds. Mineral Cycling in Southeastern Ecosystems. ERDA Symp. Series. Conf. -740513.

Turner, J.; Singer, M.J. 1976. Nutrient distribution and cycling in a sub-alpine coniferous forest ecosystem. J. Appl. Ecol. 13: 295-301.

Verstraten, J.M. 1977. Chemical erosion in a forested watershed in the Oesling, Luxemburg. Earth Surface Processes 2: 175-184. Also in Clayton 1979.

Vitousek, P.M.; Melillo, J.M. 1979. Nitrate losses from disturbed forests: patterns and mechanisms. Forest Sci. 25(4): 605-619.

Waide, J.B.; Swank, W.T. 1976. Nutrient cycling and the stability of ecosystems: Implications for forest management in the southeastern U.S. Proc. Soc. Amer. For., 1975: 404-424.

Welch, T.G.; Klemmedson, J.O. 1975. Influence of the biotic factor and parent material on distribution of nitrogen and carbon in ponderosa pine ecosystems. Forest Soil and Land

Management. Pages 159-178 in Proc. 4th N. Amer. Forest Soils Conf., Laval Univ., Quebec. Aug. 1973.

Wells, C.G.; Jorgensen, J.R. 1975. Nutrient cycling in loblolly pine plantations. Forest Soils and Forest Land Management. Pages 137-158 in Proc. 4th N. Amer. Forest Soils Conf., Laval Univ., Quebec. Aug. 1973.

Westlake, D.F. 1963. Comparison of plant productivity. Biol. Rev. 38: 385-425. Also in Jordan, C.F. 1979 loc. cit.

Westoby, J.C. 1979. Forest industries for socio-economic development. Commmonwealth For. Rev. 58(2): 107-116.

Whitmore, T.C. 1975. Tropical rainforests of the Far East. Clarendon Press, Oxford. 282 p.

Wiebe, H. 1974. The chemical constituents of precipitation from the Canadian WMO Stations. Intern. Rep. AROA-10-74.

Wollum, A.G.; Davey, C.B. 1973. Nitrogen accumulation, transformation and transport in forest soils. Pages 67-106 in Bernier, B.; Winget, C.H. 1975. Forest Soil and Forest Land Management. Environ. Can., Can. For. Serv.

Wood, B.W.; Wittwer, R.F.; Carpenter, S.B. 1977. Nutrient element accumulation and distribution in an intensely cultured American sycamore plantation. Plant and Soil 48(2): 417-433.

Woodwell, G.M.; Whittaker, R.H. 1967. Primary productivity and the cation budget of the Brookhaven Forest. Pages 151-166 in Proc. Symp. Primary Productivity and Mineral Cycling in Natural Ecosystems. Univ. Maine.

ANNEXE

Tableau 1. Production moyenne de bois et de litière d'espèces feuillues dans cinq zones de latitude différentes (tonnes ha^{-1} an^{-1})

Zone	Bois	Litière	Total	Source
Septentrionale	4,20	4,10	8,30	Timmer (1981), Alban et al. 1978
Tempérée	6,58	3,28	9,86	Jordan (1979)
Méridionale tempérée	6,10	3,67	9,77	"
Subtropicale	7,58	6,44	14,02	"
Tropicale	7,34	9,57	16,91	"

Tableau 2. Répartition des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers (d'après Pritchett 1979) (Les chiffres entre parenthèses = % du total)

Contenu en éléments nutritifs	Biomasse	Couverture morte	Sol minéral	Total
		($kg\ ha^{-1}$)		
		FORÊT BORÉALE (Moyenne de 8 types)		
N	252 (10%)	699 (28%)	1556 (62%)	2507,0
P	25 (8%)	76 (25%)	200 (66%)	301,0
K	124 (25%)	271 (54%)	106 (21%)	501,0
Ca	216 (47%)	160 (35%)	85 (18%)	461,0
		FORÊT TROPICALE HUMIDE		
N	2016 (30%)	35 (0,5%)	4592* (69%)	6643,0
P	241 (88%)	1,5 (0,5%)	33 (12%)	275,5
K	4598 (89%)	25 (0,5%)	508 (10%)	5131,0
Ca	4702 (20%)	132 (0,5%)	8582* (80%)	23416,0

*Les valeurs pour l'azote et pour le calcium relativement à une forêt de caatinga colombien sont beaucoup plus faibles. Voir le Tableau 5.

Tableau 3. Concentration de N, de P, et de Ca dans les éléments de bois de feuillus échantillonnés en juillet/août (d'après Carlisle et Methven 1979)

Espèce	Bois de fût	Écorce de tige	Branches	Feuilles et rameaux	Bois de fût	Écorce de tige	Branches	Feuilles et rameaux	Bois de fût	Écorce de tige	Branches	Feuilles et rameaux
	% d'azote bois anhydre				% de phosphore bois anhydre				% de calcium bois anhydre			
Érable[1]	0.06	0.42	0.16	1.05	0.006	0.02	0.02	0.16	0.30	2.98	0.48	0.94
Bouleau[2]	0.07	0.29	0.18	1.17	0.005	0.02	0.02	0.09	0.29	1.69	0.68	0.67
Tremble[3]	0.07	0.33	0.14	1.49	0.004	0.05	0.02	0.01	0.88	1.07	0.68	0.90
Chêne[4]	0.11	0.37	0.26	1.42	0.004	0.02	0.06	0.10	0.10	2.43	0.69	0.18

[1]Acer saccharum; [2]Betula papyrifera; [3]Populus tremuloides; [4]Quercus.

Arbres ayant de 40 à 70 ans.

Tableau 4. Répartition de l'azote dans les écosystèmes forestiers tempérés (N kg ha^{-1})[1] (Carlisle et Methven 1979)

		Âge (années)	Tiges (+ écorce)	Branches (+ écorce)	Racines	Feuilles	Total du sol	Litière	Total	Auteur
Sapin de Douglas	(*Pseudotsuga menziesii*)	36	125	61	32	102	2809	175	3304	Cole 1967
Pin ponderosa	(*Pinus ponderosa*)	50	194	95	37	109	3540	413	1202	Welch et Klemmedson 1975
Pin rouge	(*Pinus resinosa*)	39	155	60	75	131	2750	538	--	Alban et al. 1978
Pin sylvestre	(*Pinus sylvestris*)	55	88	57	184	124	--	409	--	Ovington 1962
Pin gris	(*Pinus banksiana*)	40	118	76	37	65	2312	689	3297	Alban et al. 1978
Pin à l'encens	(*Pinus taeda*)	16	115	34	64	82	1753	307	--	Wells et Jorgensen 1975
Épinette blanche	(*Picea glauca*)	40	102	127	67	153	2542	752	3743	Alban et al. 1978
Cryptomeria	(*Cryptomeria japonica*)	55	161	41	112	170	6900	92	--	Harada 1972
Aulne rouge	(*Alnus rubra*)	34	309	23	176	100	5450	877	6935	Turner et Singer 1976
Sycomore	(*Platanus occidentalis*)	3	15	5	--	32	--	--	--	Wood et al. 1977
Peuplier hybride	(*Populus* x)	40	199	82	89	87	2542	752	3751	Alban et al. 1977, 1978
Peuplier hybride	(*Populus* x)	1	78	--	43	114	--	--	--	Frison 1967
Hêtre	(*Fagus sylvatica*)	90	290	660	150	100	7800	86	--	Nihlgard 1972

[1]Contenu en azote de la végétation du sol omis parce que peu important.
Établi d'après les données de base fournies par les auteurs et converti en unités courantes.

Tableau 5. Répartition des éléments macronutritifs dans les forêts tropicales (kg ha^{-1})

	Type de forêt	Total de la cime	Feuilles	Racines	Autre végéta-tion	Sol dans la zone des racines[3]	Sous-horizon L +sous-horizon F +sous-horizon H +bois mort
					AZOTE		
Colombie	Forêt primaire[1]	741	--	--	--	5350[3]	672
"	Forêt secondaire[2]	713	--	--	--	6640[3]	332
Ghana	Forêt secondaire[2]	1283	480	324	170	4592[4]	265
Colombie	Caatinga[5]	336	72	834	--	785	132
					PHOSPHORE		
Colombie	Forêt primaire[1]	27	--	--	--	254[3]	18
"	Forêt secondaire[1]	55	--	--	--	222[3]	12
Ghana	Forêt secondaire[2]	84	32	23	7	13[4]	20
					POTASSIUM		
Colombie	Forêt primaire[1]	227	--	--	--	119[4]	32
"	Forêt secondaire[2]	496	--	--	--	98[4]	21
Ghana	Forêt secondaire[2]	656	194	142	62	650[4]	46
					CALCIUM		
Colombie	Forêt primaire[1]	432	--	--	--	31[4]	94
"	Forêt secondaire[2]	558	--	--	--	79[4]	106
Ghana	Forêt secondaire[2]	1564	485	258	280	2576[4]	45
Colombie	Caatinga[5]	239	17	224	--	195	67

[1]Folster et al. 1976; [2]Greenland et Kowal 1960; [3]Valeurs totales du sol; [4]Disponible/échangeable; [5]Herrera et Jordan 1981.
Établi d'après les données de base des auteurs et converti en unités courantes.

Tableau 6. Gains d'éléments dus aux précipitations[1] (kg ha^{-1} an^{-1})

Lieu	N	P	K	Ca	Ouvrages de référence
É.-U.					
Maine	1.9 - 2.5	2.9	2.9	13.0	Pearson et al. 1971
Massachussets	2.2 - 2.3	--	2.0 - 5.6	2.9 - 4.9	Pearson et al. 1971
New Hampshire	3.8 - 7.4	--	0.6 - 2.5	1.6 - 3.0	Likens et al. 1971
État de New York	7.2 - 9.4	--	3.6 - 3.9	9.9 - 23.5	Pearson et al. 1971
Connecticut	2.5	--	1.6	4.9	Pearson et al. 1971
Ohio	12.0	--	0.9	0.1	Carroll 1962
Virginie	3.0	--	1.1	7.5	Fisher et al. 1968
Pennsylvanie	--	--	1.0	5.6	Carroll 1962
Caroline du Nord	3.1 - 4.4	--	1.6 - 3.3	6.0 - 9.5	Fisher et al. 1968
Floride	3.0	--	1.8	6.0	Carroll 1962
Washington	5.3	--	12.0	--	Carroll 1962
Californie	5.7	--	2.7	0.9	Carroll 1962
Texas	3.1	--	1.2	--	Carroll 1962
CANADA					
Lac Supérieur	6.8	0.2	1.6	4.0	Andren et al. 1977
Lac Huron	8.7	0.2	5.4	7.0	Andren et al. 1977
Ontario	3.0 - 41.4	0.2 - 1.2	1.0 - 10.1	2.8 - 16.0	Sanderson 1977 Wiebe 1974; Jeffries 1978;
Nouvelle-Écosse	3.9	--	--	--	Schindler 1976

[1]Établi d'après les données des auteurs et en convertissant les unités. Ces données valent pour les précipitations envisagées dans leur ensemble.

Tableau 7. Apport de bases dans l'eau de pluie et les aérosols (d'après Miller 1979)

	Ca	K	Mg
		kg ha^{-1} an^{-1}	
Allemagne (hêtre)[1]			
Eau de pluie	13	4	3
Aérosols	6	5	1
Écosse (pin de Corse)[2,3]			
Eau de pluie	3	3	3
Aérosols	4	7	2

[1]Mayer et Ulrich 1974.
[2]Miller, Cooper et Miller 1976.
[3]Pinus nigra var. calabrica.

Tableau 8. Fixation de l'azote par des plantes et des écosystèmes différents (principalement d'après Fortin et al. 1979)

	Auteur	Fixation de l'azote kg $ha^{-1}an^{-1}$
TYPES DE FORÊT TEMPÉRÉE		
Sapin de Douglas	Cromach dans Todd et al. 1978; Burns et Hardy 1975; Jones dans Todd et al. 1978	12-58
Conifères mélangés	Todd et al. 1978	12.5
Épinette noire[1]	Brouzes et al. 1969	1.5
Épinette de Norvège[2]	Granhall et Lindberg 1978	0.4
Pin sylvestre[3]/ Épinette de Norvège	Granhall et Lindberg 1978	3.2
Hêtre[4]	Burns et Hardy 1975	0.4
Aulne[5]	Bond 1967; Burns et Hardy 1975; Wollumn et Davey 1973; Fortin 1979	12-300
Feuillus mélangés	Todd et al. 1978	12-[illegible]
Chêne, Caryer	Todd et al. 1978	12
AGRICULTURE		
Fève de soya	Burns et Hardy 1975 dans Fortin 1979	91-94
Arachides	Burns et Hardy 1975 dans Fortin 1979	47-91
Pois, lentilles, vesces	Burns et Hardy 1975 dans Fortin 1979	85
Luzerne	Burns et Hardy 1975 dans Fortin 1979	128-300
Lupin	Burns et Hardy 1975 dans Fortin 1979	150
Prairie	Burns et Hardy 1975 dans Fortin 1979	15
Riz non décortiqué	Burns et Hardy 1975 dans Fortin 1979	10-55
FORÊT TROPICALE		
Forêt ombrophile (Amérique du sud)	Todd et al. 1978	14-88

[1]*Picea mariana*; [2]*Picea abies*; [3]*Pinus sylvestris*; [4]Esp. *Fagus*; [5]Esp. *Alnus*.

Tableau 9. Production d'éléments par des minéraux (d'après les données sur la météorisation fournies par Birkeland 1974 et Clayton 1979) (estimations grossières)

Élément	Minéral	Production par météorisation kg ha^{-1} an^{-1}
Na	Plagioclase	52
K	Biotite Feldspath potassique	23
Ca	Plagioclase	26
Mg	Biotite	10
Fe	Biotite	11

Tableau 10. Libération d'éléments due à la météorisation selon la méthode de calcul du bilan (d'après Clayton 1979)

Lieu	Type de roche	K kg ha^{-1} an^{-1}	Ca	Mg dégagé	Ouvrage de référence
White Mountains, Californie	Dolomie	4	86	32	Marchand (1971)
White Mountains, Californie	Ademellite	8.0	17.0	2	Marchand (1971)
Cascades, Oregon	Brèches volcaniques pyroclastiques	1.6	47	11.6	Frederiksen (1972)
Luxemburg	Schiste argileux	0.2	8.7	15.7	Verstraten (1977)
Piedmont, Maryland	Schiste	2.3	1.3	1.7	Cleaves et al. (1974)
Piedmont, Maryland	Serpentinite	tr	tr	34.1	Cleaves et al. (1974)
Hubbard Brook	Moraine/Gneiss	7.1	21.1	3.5	Likens et al. (1977)
Brookhaven, État de New York	Sables fluvio-glaciaires	11.1	24.2	8.4	Woodwell et Whittaker (1967)
Minimum et maximum	--	tr-11.1	tr-86	2-52	--

Tableau 11. Résumé des gains d'éléments nutritifs dont bénéficient les écosystèmes forestiers (kg ha^{-1} an^{-1})

	N	P	K	Ca
Précipitations[1]	1.9-41.4 (moyenne de 5,0)	0.1-2.9[3] (moyenne de 1,0)	0.6-12.0 (moyenne de 2,5)	0.9-23.5 (moyenne de 6,0)
Météorisation des minéraux[2]	--	--	tr - 11.1	tr - 96
Fixation de l'azote	0-300[4] (moyenne de 12-20)	--	--	--
Aérosols[5]	?	?	5-7	4-6

[1]Les aérosols ne sont inclus que partiellement. Dans certaines régions, les éléments nutritifs provenant des aérosols sont presque aussi importants que ceux provenant des précipitations. Les données valent pour l'Amérique du Nord.
[2]Dans les forêts tempérées, on a utilisé les données obtenues par les techniques de calcul du bilan.
[3]Les estimations des niveaux de phosphore dans les précipitations sont habituellement faibles à cause des difficultés techniques de collecte.
[4]Le chiffre le plus élevé vaut pour l'esp. Alnus. Les écosystèmes de forêt tempérée fixent environ 12 à 20 kg ha^{-1} an^{-1} (Todd et al. 1978). (Voir le Tableau 8).
[5]Les données valent pour deux endroits seulement, l'Allemagne centrale et l'Écosse.

Canada